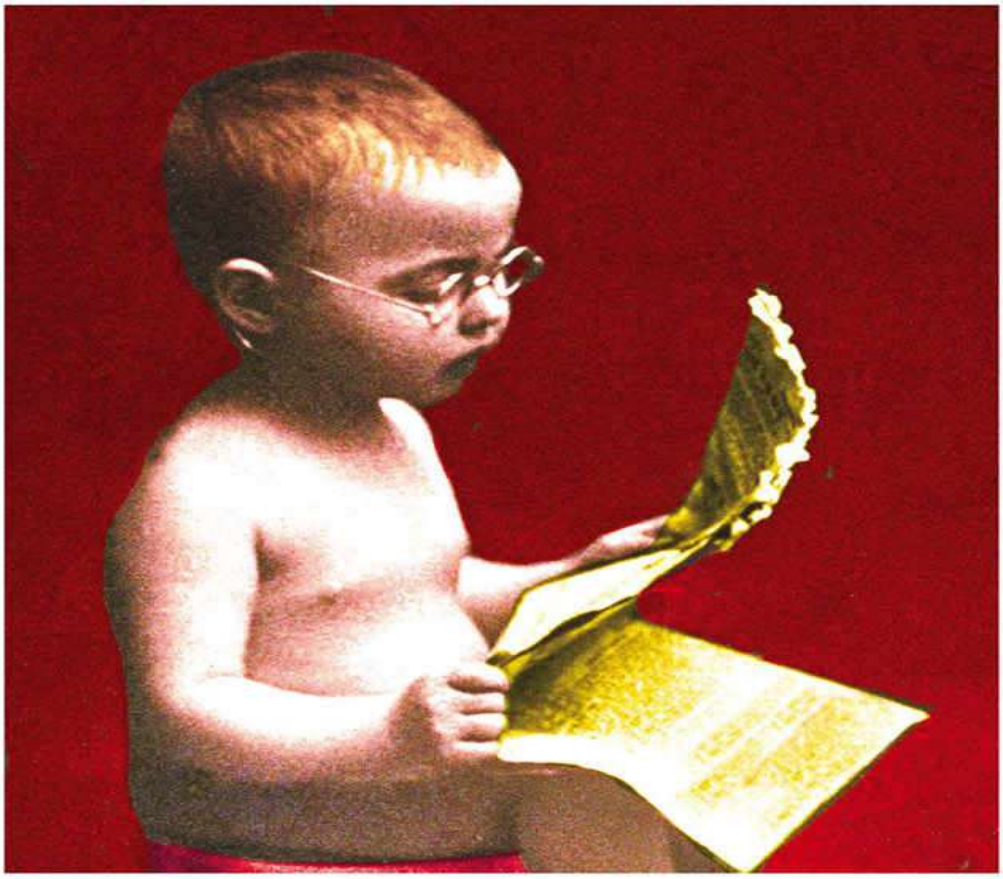
STANISLAS DEHAENE

LES NEURONES DE LA LECTURE



préface de
Jean-Pierre Changeux

Odile Jacob

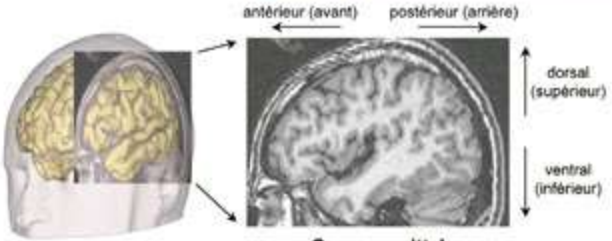
Stanislas DEHAENE

Les Neurones de la lecture

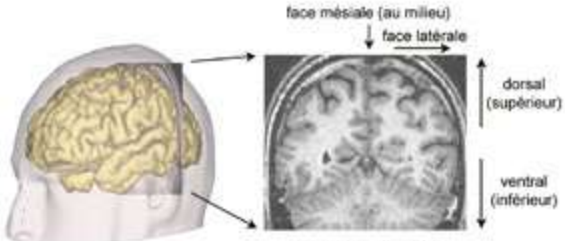
Préface de Jean-Pierre Changeux

Odile Jacob

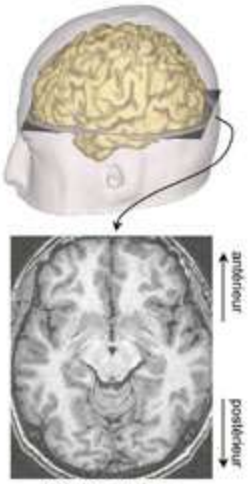
Savoir s'orienter dans le cerveau



Coupe sagittale

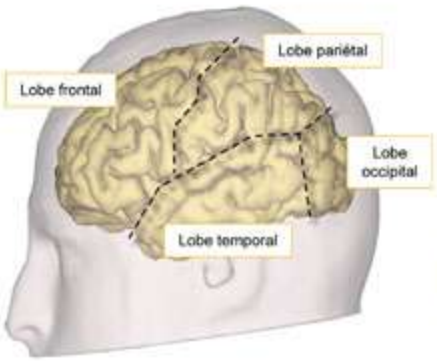


Coupe coronale

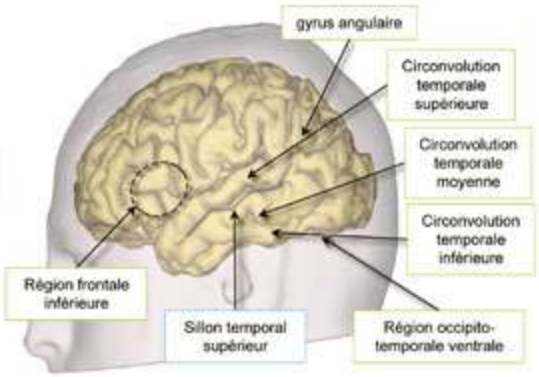


Coupe axiale

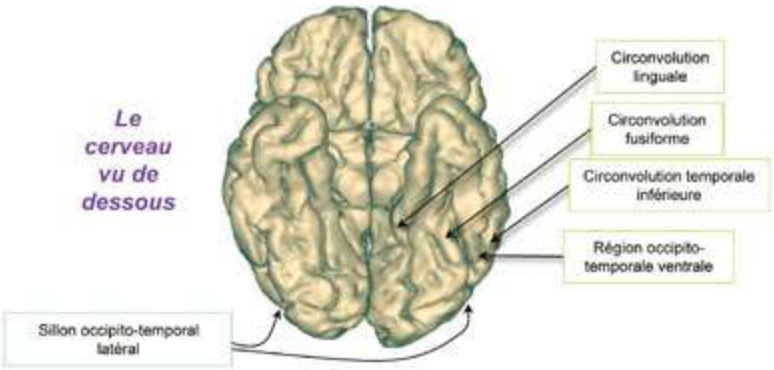
Les grands lobes



Les régions importantes pour la lecture



Le cerveau vu de dessous



© ODILE JACOB, AOÛT 2007

15, RUE SOUFFLOT, 75005 PARIS

www.odilejacob.fr

EAN : 978-2-7381-8669-0

Le code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5 et 3 a, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou réproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4). Cette représentation ou reproduction donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Ce document numérique a été réalisé par Nord Compo

Préface

par Jean-Pierre Changeux

Depuis l'émergence des neurosciences dans les années 1970, des progrès considérables ont été réalisés dans la connaissance de notre cerveau. Le déchiffrage du génome humain a révélé toutes les molécules qui le composent. Le développement fulgurant des méthodes d'imagerie cérébrale a rendu accessible l'identification des bases neurales de notre psychisme. Il reste cependant encore à relier entre eux les multiples niveaux d'organisation emboîtés de notre cerveau et en faire une synthèse pertinente qui nous permettra de comprendre les fondements neuronaux de la pensée consciente ou de la création.

On sait depuis Aristote que, si l'homme est un animal rationnel, il est aussi par nature un animal social, qui communique par le langage. Il a su, dès ses origines, créer une mémoire de ses faits et gestes, de ses symboles et de ses mythes, de ses savoirs et de ses traditions, et la transmettre de génération en génération. Il a développé une culture, ou plutôt des cultures.

Sans doute à cause du dualisme platonicien, la tradition occidentale a établi un clivage – que je n'hésiterai pas à qualifier de tragique – entre les sciences de l'homme et les sciences biologiques. Au point que l'on s'est longtemps accordé pour opposer le biologique au culturel, la nature à la culture, les gènes à l'apprentissage. Un des points forts des neurosciences contemporaines – l'ouvrage de Stanislas Dehaene le démontre à merveille – est d'avoir démontré que, chez l'homme, le culturel ne peut se penser sans le biologique et que le cérébral n'existe pas sans une puissante imprégnation de l'environnement. La césure platonicienne entre le cerveau et l'esprit s'abolit au bénéfice de la construction d'une architecture

cérébrale commune, source d'un immense univers combinatoire entre les gènes et l'environnement. En outre, un des traits les plus frappants du cerveau de l'homme est que, dès les premières étapes de son développement, et déjà dans le sein maternel, son organisation fonctionnelle fait preuve d'une exceptionnelle *plasticité* qui lui permettra d'acquérir l'écriture.

La culture ne se confond pas avec l'écriture, loin s'en faut. Les peuples sans écriture ont produit d'innombrables inventions culturelles qui servent de socle à notre civilisation. On compte au nombre de ces *œuvres*, et de leurs « intermédiaires mentaux », ou *signes* pour reprendre les termes d'Ignace Meyerson, les œuvres d'art, visuelles ou musicales, les rituels et systèmes symboliques, les codes de conduite, essentiels au renforcement à la vie en commun du groupe social. Beaucoup ne requièrent pas le langage, mais se propagent, se transmettent, se perpétuent par les gestes et les mimiques, par de multiples témoignages visuels ou sonores de la mémoire collective, mais aussi par leurs inscriptions dans des matériaux plus stables que le tissu nerveux : les pigments minéraux, la terre, le bois, la pierre, l'ivoire… « Il n'y a pas de signe sans matière », écrivait Meyerson.

De son côté, l'usage du langage parlé a fait progresser la conquête de l'homme sur lui-même et sur ses œuvres en lui donnant accès à un enrichissement supplémentaire majeur : en accédant au domaine sonore, il est devenu possible de catégoriser et de classer, de désigner et de nommer, d'unir le sens au son, le signifié au signifiant. L'extrême compaction et les multiples propriétés de la désignation sonore ont, certes, facilité l'articulation des objets de sens dans l'espace conscient. Ils ont aussi permis leur organisation sous la forme rythmée et imagée de la poésie et, sous la forme logique et rationnelle de la connaissance objective et bientôt de la science. Comme le souligne Gerald Edelman, l'usage du langage a donné accès à un niveau supérieur de conscience. Une compréhension du monde immensément diversifiée a pu s'échafauder par le truchement du langage. Mais la nécessité s'est fait jour, pour l'homme sédentarisé, de la rendre plus largement visible et transmissible que par la parole. Et également de la conserver fidèlement, au-delà de la vulnérabilité de la matière cérébrale et de la survie de l'individu. Aussi, pour suppléer sa mémoire défaillante, l'homme a inventé l'écriture, il y a quelque 5 000 ans. Son cerveau lui a permis d'incorporer cette invention alors que celui du singe n'a pas permis

à ce dernier de le faire. Comme nous le décrit avec talent Stanislas Dehaene, l'homme apprend à lire avec son cerveau.

Depuis *Sahelanthropus* et *Australopithecus,* nos plus lointains ancêtres connus, le cerveau de l'*Homo sapiens* a profondément évolué, que ce soit par sa taille et le nombre de ses neurones, ou par sa forme et son organisation. On assiste en particulier à une expansion fulgurante du cortex cérébral et plus particulièrement du cortex préfrontal. Éminent philosophe des Lumières, Helvétius, lamarckiste avant l'heure, croyait qu'un apprentissage adéquatement enrichi devait permettre d'« instruire » un cerveau de singe en cerveau d'homme. Une controverse très vive s'ensuivit avec Diderot qui n'en acceptait pas l'idée et qui, sans nier les apports essentiels d'un apprentissage instructif, soulignait la différence insurmontable de prédispositions cérébrales, propres à l'espèce, entre le singe et l'homme. La tradition empiriste qu'illustre Helvétius, et qui s'enracine dans les écrits d'Artistote et de Locke, reste populaire dans le champ des sciences sociales et des lecteurs de Jean-Jacques Rousseau. Elle apparaît même souvent comme politiquement correcte en laissant croire à l'absence de différences individuelles et à la toute-puissance d'un apprentissage global et universel. À l'opposé, depuis Platon et Descartes, les thèses innéistes resurgissent constamment sous la plume de philosophes anglo-saxons, linguistes ou généticiens, et même dans le débat politique. Selon Noam Chomsky, la grammaire générative[1], basée sur la distinction entre compétence et performance, serait l'expression de dispositions « génétiquement déterminées », comme le serait l'organisation du système visuel. Le problème, c'est que la relation entre les dispositions génétiques et l'organisation du système visuel sont loin d'être simples, et surtout comprises ! La génétique des troubles du langage parlé, très prometteuse, révèle l'importance de gènes comme FoxP2, que certains s'empressent, avec Steven Pinker, de qualifier de « gènes du langage ». Pourtant, on les retrouve chez l'animal… qui, lui, ne parle pas !

Beaucoup plus difficile est le problème soulevé par la comparaison des génomes désormais complètement séquencés de la souris, du singe et de l'homme. Paradoxalement, ces génomes se ressemblent énormément puisqu'ils contiennent le même nombre de gènes, et parfois même moins chez l'homme que chez la souris ! Les similitudes structurales sont également importantes puisque la séquence du génome du chimpanzé ne

diffère de celle de l'homme que de 1,2 % en moyenne. En d'autres termes, au cours de l'évolution, la complexité du génome varie peu comparée à celle du cerveau.

Comment expliquer alors que de si modestes changements géniques entraînent une réorganisation aussi dramatique de l'architecture cérébrale ? Des gènes ayant des effets « globaux », comme ceux qui entraînent la microcéphalie, contrôlent le nombre total de divisions des précurseurs de nos cellules nerveuses. D'autres, par leur expression quantitative, contribuent aux changements de « forme » et de surface des cartes cérébrales, en particulier à l'expansion fulgurante du cortex préfrontal. Cela suffirait-il pour résoudre le paradoxe ? Selon moi, la réponse est non !

Il faut penser autrement, réfléchir à des processus d'un autre type, de nature « épigénétique », qui permettent une alliance forte des gènes et de l'expérience dans la construction de la complexité cérébrale. Il faut d'abord noter que, de la souris au macaque puis à l'homme, le cortex cérébral a évolué, sa surface a augmenté, accroissant ainsi la *variabilité* du réseau neuronal, tout comme ses capacités d'adaptation aux influences de l'environnement. En outre, les millions de milliards de connexions synaptiques du cerveau de l'homme ne se mettent pas en place en une seule étape, comme on assemble un ordinateur, mais progressivement, pendant les longues années de maturation du cerveau du fœtus à l'homme adulte. La durée de vie de l'homme primitif était de l'ordre de la trentaine d'années. De la conception à l'adolescence, il passait ainsi la moitié de sa vie à construire son cerveau ! Cette « épigenèse » postnatale va jouer un rôle décisif dans la mise en place de l'empreinte culturelle. En effet, l'état d'activité du réseau, spontanée ou suscitée par l'interaction avec le monde extérieur, va intervenir dans la construction de la connectivité cérébrale. Le dépôt des strates successives que forment les arborisations neuronales est modelé, au cours des *jeux cognitifs* du nouveau-né et du jeune enfant, par les signaux de l'environnement physique, social et culturel. La marge de variabilité offerte par une enveloppe génétique élargie permet ce que l'on peut appeler une « appropriation » des réseaux de neurones en développement et leur amplification sous la forme de « circuits culturels ». La nouveauté entre dans un cerveau humain incomplètement spécifié par son équipement génétique et ainsi la lecture s'inscrit dans le cerveau.

L’ouvrage de Stanislas Dehaene est important d’abord par la présentation qu’il fait de ses propres travaux sur les neurosciences de la lecture, qui commencent avec la reconnaissance des lettres par la rétine et l’extraction des composants de base des mots, comme les syllabes. Puis notre système visuel entre en action avec la participation de neurones que l’on retrouve chez le singe, mais spécialisés dans la réponse à des formes élémentaires plus simples. À ce premier déchiffrage succède une double analyse : celle du son et celle du sens. Stanislas Dehaene nous fait participer à la passionnante découverte des circuits nerveux mobilisés par la lecture. À la fin du XIX^{e} siècle, Jules Déjerine avait découvert qu’une lésion localisée du cerveau entraînait un déficit sélectif de la lecture sans que l’écriture en soit affectée, ni d’ailleurs aucune autre de ses capacités. Il a dès lors proposé l’existence d’un « centre visuel des lettres », localisé dans la circonvolution angulaire, à la base de la région pariétale gauche. Il interprétait alors ces données sur la base d’une voie linéaire de la lecture. Aujourd’hui, on envisage plutôt un réseau complexe et foisonnant qui impliquerait voies visuelles *et* voies auditives, et plus spécifiquement les représentations du sens, des sons et de l’articulation des mots.

Ces tracés de topologie neurale nous instruisent également sur la manière dont l’enfant va acquérir l’écriture. La méthode globale, si controversée, est définitivement mise en pièces par Stanislas Dehaene, qui plaide pour une « unification des recherches pédagogiques, psychologiques et neuroscientifiques ». Une neuroscience de l’apprentissage de la lecture devient possible et nous permet enfin de progresser dans une problématique souvent beaucoup trop idéologisée ! Le gribouille du fond de la classe est enfin réhabilité et pris en charge comme il se doit. La dyslexie, par exemple, qui préoccupe tant de parents et de grands-parents, est abordée ici de manière frontale. Ce défaut de la manipulation mentale des phonèmes est en réalité le fait d’anomalies anatomiques du lobe temporal, établissant désormais la prédisposition génétique à la dyslexie. Mais qui dit génétique ne dit pas irrémédiable. Bien au contraire, un dépistage précoce permettra de développer, par des exercices d’apprentissage appropriés sur ordinateur, une stratégie compensatrice. Enfin, les enfants font souvent des erreurs de lecture ou d’écriture en miroir au début de l’apprentissage de la lecture. Notre système visuel se développe spontanément de manière symétrique et

l’enfant doit surmonter ce biais pour acquérir l’écriture. Des processus de plasticité neurale importants interviennent pour mettre en place les circuits de l’adulte. Plus remarquable encore, le jeune enfant dont l’hémisphère gauche a dû être enlevé à l’âge de 4 ans, à cause d’une tumeur envahissante par exemple, va acquérir, dès 11 ans, langage et écriture, mais avec son hémisphère droit au lieu du gauche. Une importante amplification compensatrice des circuits existant dans l’hémisphère droit va permettre à l’enfant devenu adulte de lire et d’écrire en dépit d’une lésion initiale majeure.

Les acquis récents de nos connaissances sur l’apprentissage de la lecture ouvrent des perspectives capitales dans deux directions : les sciences humaines, bien entendu, avec la perspective d’une compréhension renouvelée – neuroculturelle – de l’évolution des cultures, et la biologie et la pharmacologie des processus de sélection, d’amplification et de réafférentation des connexions interneuronales, tant au cours du développement que chez l’adulte.

Les incidences pour nos sociétés de l’ensemble de ces travaux si clairement décrits dans *Les Neurones de la lecture* sont considérables car, comme l’écrit Stanislas Dehaene, « mieux comprendre l’organe qui nous fait lire, mieux transmettre à nos enfants cette remarquable invention qu’est la lecture, rendre ces connaissances utiles au plus grand nombre, tels sont les défis pour l’avenir ».

Introduction

La science de la lecture

« Retiré dans la paix de ces déserts
En compagnie de peu de livres, mais savants,
Je converse avec les défunts
Et écoute les morts avec les yeux. »

Francisco DE QUEVEDO

Vous entamez la lecture de ce livre. Sans que vous en preniez conscience, votre cerveau accomplit une remarquable prouesse. En ce moment même, vos yeux parcourent la page par petits mouvements précis et rapides. Quatre ou cinq fois par seconde, votre regard s'arrête sur un mot que vous reconnaissez aussitôt sans effort. Comment ces quelques marques noires sur du papier blanc, s'imprimant sur votre rétine, parviennent-elles à évoquer tout un univers de couleurs et d'émotions, comme le font si bien les mots de Nabokov au début de *Lolita* ?

« Lolita, lumière de ma vie, feu de mes reins. Mon péché, mon âme. Lo-li-ta : le bout de la langue fait trois petits bonds le long du palais pour venir, à trois, cogner contre les dents. Lo. Li. Ta. »

Derrière chaque lecteur se cache une mécanique neuronale admirable de précision et d'efficacité, dont nous commençons à comprendre l'organisation. Dans les vingt dernières années est née une authentique science de la lecture. Les progrès des neurosciences et de la psychologie cognitive ont conduit à un décodage des mécanismes neuronaux de l'acte de lire. Grâce à l'imagerie par résonance magnétique, quelques minutes suffisent à présent pour visualiser les régions cérébrales qui s'activent lorsque nous déchiffrons des mots. Le fonctionnement intime de ces opérations mentales est devenu accessible à l'expérimentation. Au laboratoire, nous suivons pas à pas le cheminement des mots depuis l'analyse de la séquence des lettres jusqu'à la reconnaissance visuelle, au calcul de la prononciation et à l'accès au sens.

Sur cette base empirique, une théorie de la lecture commence à voir le jour. Elle décrit comment fonctionnent les circuits corticaux hérités de notre passé évolutif et qui, tant bien que mal, se reconvertissent à la lecture. Elle explique comment nos réseaux de neurones apprennent à lire ; par quels mécanismes, parvenus à l'âge adulte, nous lisons avec tant d'efficacité ; d'où provient que certains enfants souffrent de dyslexie ; et comment nous pouvons envisager d'y remédier.

L'objectif de ce livre est de faire partager, en des termes simples, cette science de la lecture et les avancées expérimentales qui la soutiennent. Au XXI^{e} siècle, est-il encore acceptable qu'une personne cultivée connaisse

mieux le fonctionnement de sa voiture ou de son ordinateur que celui de son propre cerveau ? Notre système scolaire, trop longtemps soumis aux aléas de l'intuition de tel ou tel décideur, ne peut plus accepter de subir réforme après réforme sans que les connaissances des neurosciences cognitives ne soient prises en compte. Parents, éducateurs et politiques l'ont d'ailleurs bien compris : beaucoup s'enthousiasment pour les nouvelles images du cerveau… au risque parfois d'en méconnaître les limites ou d'en caricaturer les implications pour l'enseignement. Trop récente, la science de la lecture n'a jamais été enseignée. Mon ambition est d'en fournir ici quelques points de repère afin que l'on ne puisse plus ignorer la complexité des opérations que notre cerveau met en œuvre pour lire.

Chacun sait bien que l'apprentissage de la lecture ne s'effectue pas sans heurts. Tous les enfants, quelle que soit leur langue, rencontrent des difficultés au moment d'apprendre à lire, et on estime que 10 % d'entre eux, devenus adultes, ne maîtriseront toujours pas les rudiments de la compréhension d'un texte. Des années de travail sont nécessaires avant que les rouages cérébraux de la lecture, bien huilés, se fassent enfin oublier. Pourquoi une telle difficulté ? Quelles sont les profondes modifications que l'apprentissage de la lecture impose aux circuits du cerveau ? Peut-on prouver que certaines stratégies d'apprentissage sont mieux adaptées que d'autres à l'organisation cérébrale de l'enfant ? Quelles raisons expliquent que la méthode globale ne soit pas la plus efficace ? À toutes ces questions, et même si beaucoup reste encore à découvrir, la nouvelle science de la lecture commence à apporter quelques réponses précises.

Elle éclaire également les pathologies de la lecture. Au fil des pages, nous ferons la connaissance de patients qui, à la suite d'un accident vasculaire, perdent soudainement la faculté de lire. Nous aborderons également la question de la dyslexie, un vaste problème de société dont les origines commencent à être identifiées. Il est à présent incontestable que le cerveau de certains dyslexiques n'est pas tout à fait comme les autres : plusieurs gènes de susceptibilité à la dyslexie ont été identifiés, la plupart altèrent la migration des neurones avant même la naissance et pourraient expliquer les anomalies anatomiques et fonctionnelles que montre le cerveau des enfants dyslexiques. La résignation n'est pourtant pas de mise : de nouvelles stratégies thérapeutiques, fondées sur la rééducation intensive des circuits du langage et de la lecture, sont en train de voir le jour, et

l’imagerie cérébrale mesure pas à pas les progrès qu’elles induisent dans le cerveau des enfants.

De toutes ces recherches émerge un nouvel espoir : celui de voir apparaître une véritable neuroscience de l’éducation, à la frontière entre la psychologie et la médecine, capable d’exploiter les nouvelles images du cerveau afin d’optimiser les stratégies d’enseignement et de les adapter à chaque cerveau d’enfant ou d’adulte.

L’énigme du primate qui sait lire

Notre capacité d’apprendre à lire pose une curieuse énigme, que j’appelle le paradoxe de la lecture : comment se peut-il que notre cerveau d’*Homo sapiens* paraisse finement adapté à la lecture, alors que cette activité, inventée de toutes pièces, n’existe que depuis quelques milliers d’années ? L’écriture est née il y a environ 5 400 ans chez les Babyloniens et l’alphabet lui-même n’est vieux que de 3 800 ans. Ces durées ne sont qu’un instant au regard de l’évolution. Notre génome n’a pas eu le temps de se modifier pour développer des circuits cérébraux propres à la lecture. Notre cerveau de lecteur se construit donc à l’aide d’instructions génétiques identiques à celles qui, voilà quelques dizaines de milliers d’années, permettaient à nos ancêtres chasseurs-cueilleurs de subsister : nous partageons les émotions de Nabokov et la théorie d’Einstein avec un cerveau de primate conçu pour la survie dans une savane africaine. Rien, dans notre évolution, ne nous a préparés à recevoir des informations linguistiques par la voie du regard. Et pourtant, l’imagerie cérébrale nous montre, chez le lecteur adulte, des mécanismes hautement évolués et adaptés aux opérations que requiert la lecture.

Nous nous trouvons devant une situation comparable à celle qu’évoquait le pasteur William Paley en 1802 dans sa *Théologie naturelle*. Imaginez, écrivait-il, qu’en traversant une lande déserte, je trouve sur le sol une montre, complète, avec ses rouages et ses mécanismes clairement destinés à donner l’heure. Ne serait-ce pas la preuve de l’existence d’un horloger, capable d’une intention créatrice, qui l’a conçue à cet usage ? De même, argumentait Paley, les plans d’organisation des êtres vivants, tels les étonnants mécanismes de l’œil, sont clairement conçus dans un but. Leur

existence apporte donc la preuve qu'un Grand Horloger est à l'œuvre dans la Nature.

Charles Darwin s'est illustré en réfutant l'argumentation de Paley : la sélection naturelle, principal artisan de l'organisation des êtres vivants, est parfaitement capable de produire des structures organisées et qui semblent dirigées vers un but. Un examen attentif, cependant, montre que leur organisation est loin d'atteindre la perfection que l'on attendrait d'un architecte omnipotent. Toute une série d'anomalies démontre que l'évolution n'est pas dirigée par une intelligence créatrice, mais suit des voies hasardeuses, simplement sélectionnées pour leur valeur de survie. C'est ainsi, par exemple, que, dans la rétine, les vaisseaux et les nerfs sont disposés *devant* les photorécepteurs, bloquant une partie de la lumière et créant, en un point, une zone insensible à la lumière (qu'on appelle la tache aveugle). À la suite de Darwin, Steven Jay Gould a donné de nombreux exemples de ces imperfections de la sélection naturelle, dont celui du fameux pouce du panda[2]. L'évolutionniste Richard Dawkins a également décrit par quelles voies plausibles les délicats mécanismes de l'œil ou de l'aile du colibri avaient pu émerger de l'action dépourvue de finalité du « grand horloger aveugle » qu'est l'évolution[3].

Cependant, le problème que pose la lecture est en partie différent de celui qu'évoque le pasteur Paley. Les délicats rouages de la mécanique cérébrale qui nous permettent de lire sont aussi complexes que ceux d'une montre abandonnée sur une lande déserte. Toute leur organisation est tendue vers un but apparent : identifier les mots écrits avec précision et rapidité. Pourtant, ni l'hypothèse d'un créateur intelligent ni celle d'une évolution par sélection naturelle ne paraissent l'expliquer. Le temps a tout simplement manqué pour que l'évolution conçoive des circuits spécialisés pour la lecture. Alors, comment un cerveau de primate parvient-il à lire – et à lire de façon aussi efficace ? Comment nos aires cérébrales, issues de millions d'années d'évolution dans un monde sans écriture, parviennent-elles à s'adapter aux problèmes spécifiques que pose la reconnaissance des mots ?

L'unité biologique et la diversité des cultures

La lecture n’est qu’un exemple des activités culturelles étonnamment diverses que l’espèce humaine a créées en quelques dizaines de milliers d’années. Au premier abord, un gouffre semble séparer ces inventions culturelles de la biologie du cerveau. C’est pourquoi la question des apprentissages tels que la lecture est rarement posée en termes biologiques. Rares sont les chercheurs en sciences sociales qui considèrent la biologie du cerveau et la théorie de l’évolution pertinentes pour leur domaine d’étude. La plupart adhèrent à un modèle implicite du cerveau que j’appellerai ici celui de la plasticité généralisée et du relativisme culturel. Selon eux, le cerveau est un organe tellement flexible et malléable qu’il ne contraint en rien l’étendue des activités humaines. C’est une idée ancienne, que l’on retrouve dans les écrits des philosophes empiristes britanniques John Locke, David Hume et George Berkeley : le cerveau de l’homme serait comparable à une ardoise vierge, où viendraient s’imprimer, à travers le filtre des cinq sens, les données de l’environnement naturel mais aussi culturel.

Revisitée par de nombreux théoriciens du relativisme culturel au XX^{e} siècle, cette vision de l’homme remet en question l’idée même d’une nature humaine. La nature humaine ne s’imposerait pas à nous en tant qu’espèce biologique. Elle se construirait progressivement, de façon malléable, par immersion dans une culture donnée. Ainsi, les enfants qui naîtraient dans la culture inuit, chez les Indiens mundurucus d’Amazonie ou dans une famille juive de l’Upper East Side de New York n’auraient guère de points communs. La perception de la couleur, l’appréciation de la musique ou le sens moral seraient éminemment variables d’une culture à l’autre – seule la capacité même d’apprendre serait caractéristique de notre nature humaine. La question des bases cérébrales des objets culturels tels que la lecture ne serait donc pas pertinente : libéré des entraves de la biologie, le cerveau humain, à la différence de celui des autres espèces animales, serait capable d’absorber toute forme de culture, aussi variée soit-elle.

Ce que j’entends montrer ici, c’est à quel point les données récentes de l’imagerie cérébrale et de la neuropsychologie récusent ce modèle simpliste des relations entre cerveau et culture. En examinant l’organisation cérébrale des circuits de la lecture, nous verrons à quel point est fausse l’image d’un cerveau vierge, infiniment malléable, et qui se contenterait d’absorber les

données de son environnement culturel. Notre cerveau est évidemment capable d'apprentissage, sans quoi il ne pourrait jamais incorporer les règles propres à l'écriture latine, japonaise ou arabe. Mais cet apprentissage est limité. Chez tous les individus, dans toutes les cultures du monde, la même région cérébrale, à quelques millimètres près, intervient pour décoder les mots écrits. Qu'on lise en français ou en chinois, l'apprentissage de la lecture passe toujours par un circuit identique.

Sur la base de ces données, je serai amené à proposer un autre modèle, radicalement opposé à celui du relativisme culturel, que j'appelle le « recyclage neuronal ». Selon cette hypothèse, l'architecture de notre cerveau est étroitement encadrée par de fortes contraintes génétiques. Toutefois, les circuits du cortex visuel des primates possèdent une certaine marge d'adaptation à l'environnement dans la mesure où l'évolution les a dotés d'une plasticité et de règles d'apprentissage. Les mêmes neurones qui reconnaissent la forme des visages ou des mains peuvent également infléchir leurs préférences afin de répondre à des objets artificiels, des formes fractales ou même des lettres. Au cours de l'évolution des primates, sans doute était-il avantageux de ne pas les spécifier d'une façon trop rigide, mais de leur laisser la possibilité de s'adapter à leur environnement. Ainsi nos gènes ne spécifient-ils souvent qu'un jeu de possibilités, une architecture de « pré-représentations » pour reprendre le terme de Jean-Pierre Changeux[4]. Je fais dès lors l'hypothèse que les inventions culturelles telles que la lecture s'insèrent dans cette marge de plasticité. Notre cerveau s'adapte à son environnement culturel, non pas en absorbant aveuglément tout ce qu'on lui présente dans d'hypothétiques circuits vierges, mais en reconvertissant à un autre usage des prédispositions cérébrales déjà présentes. Notre cerveau n'est pas une table rase où s'accumulent des constructions culturelles, c'est un organe fortement structuré qui fait du neuf avec du vieux. Pour apprendre de nouvelles compétences, nous recyclons nos anciens circuits cérébraux de primates – dans la mesure où ceux-ci tolèrent un minimum de changement.

Quelques repères de lecture

Au fil des pages, nous verrons comment le modèle du recyclage neuronal rend compte des compétences humaines pour la lecture, mais aussi

de leurs limites et même de leur histoire. Je commencerai par disséquer les mécanismes de la lecture chez l'adulte, d'abord sous l'angle psychologique, puis en examinant quelles aires cérébrales s'activent lorsque nous lisons, enfin en descendant au niveau des réseaux de neurones qui reconnaissent les lettres et les mots. J'aborderai cette dissection sous un angle résolument mécaniste, en tentant de démonter les rouages du cerveau d'un lecteur comme le révérend Paley se proposait de le faire pour la montre trouvée sur la lande déserte. Cependant, nous n'y trouverons pas un système idéal, tel qu'aurait pu le concevoir un Grand Horloger omniscient. Nous lui découvrirons de petites imperfections, qui reflètent le compromis que réalise notre cerveau entre les nécessités de la tâche et les circuits dont il dispose pour l'accomplir. Les particularités du système visuel des primates, qui commence à être bien connu, expliquent pourquoi les opérations que réalise notre cerveau n'ont rien de commun avec une quelconque reconnaissance « globale » de la forme des mots. La vision des primates ne fonctionne pas par reconnaissance globale – tout au contraire, l'objet visuel est explosé en myriades de petits fragments que notre cerveau s'efforce de recomposer, trait par trait, lettre après lettre. Reconnaître un mot, c'est d'abord analyser sa chaîne de lettres et y repérer des combinaisons de lettres (syllabes, préfixes, suffixes, racines de mots), pour enfin les associer à des sons et à des sens. C'est seulement parce que ces opérations ont été automatisées par des années d'apprentissage et se déroulent en parallèle, hors de notre conscience, qu'a pu persister pendant tant d'années l'hypothèse naïve d'une lecture immédiate et globale.

Le paradoxe de la lecture souligne le fait indubitable que nos gènes n'ont pas évolué pour nous permettre d'apprendre à lire. Je n'y vois qu'une seule solution. Si le cerveau n'a pas eu le temps d'évoluer sous la pression des contraintes de l'écriture, c'est donc l'écriture qui a évolué afin de tenir compte des contraintes de notre cerveau. Le modèle du recyclage neuronal nous conduira ainsi à revisiter l'histoire de l'écriture, depuis les premiers symboles des cultures préhistoriques jusqu'à l'invention de l'alphabet. Nous y retrouverons les traces d'un incessant bricolage évolutif qui adapte sans relâche les objets de l'écriture aux contraintes de notre cerveau. Comme nous le verrons, toutes les écritures du monde partagent de nombreux traits qui reflètent les limites de nos circuits visuels.

Poursuivant l'idée que notre cerveau n'est pas fait pour la lecture, mais qu'il s'y reconvertit tant bien que mal, nous nous intéresserons ensuite à la manière dont les enfants apprennent à lire. Une conclusion récente des recherches en neurosciences cognitives est qu'il n'y a pas des dizaines de façons de convertir un cerveau de primate en lecteur expert. En fait, il n'y a guère qu'une seule solution, une seule voie d'apprentissage que nous analyserons en détail. Il serait évidemment souhaitable que nos écoles s'en inspirent pour optimiser l'enseignement de la lecture et en réduire le taux d'échec.

Au passage, nous serons amenés à réinterpréter certains aspects frappants de l'acquisition de la lecture. Pourquoi les très jeunes lecteurs écrivent-ils parfois en miroir, de la droite vers la gauche ? Nous comprendrons pourquoi ces erreurs, contrairement à une opinion reçue, ne sont pas les premiers signes de la dyslexie, mais la conséquence naturelle de l'organisation des aires visuelles. Chez la majorité des enfants, la dyslexie semble due à une tout autre anomalie, située dans le traitement des sons du langage parlé. Nous en décrirons les signes avant-coureurs, les bases cérébrales, et les toutes dernières découvertes de la génétique.

Nous reviendrons enfin sur le fait étonnant que, seuls parmi tous les primates, nous soyons capables d'inventions culturelles aussi sophistiquées que la lecture. À l'exact opposé de la vision répandue en sciences sociales selon laquelle notre cerveau, vierge de toute structure, n'imposerait aucune contrainte aux cultures humaines, l'exemple de la lecture montre que l'organisation culturelle est inextricablement liée à celle de notre cerveau. Au cours de sa longue histoire culturelle, l'humanité a découvert qu'elle pouvait reconvertir son système visuel afin de reconnaître l'écriture. J'examinerai brièvement la possibilité de soumettre à une analyse similaire d'autres traits des cultures humaines. Les mathématiques, les arts et les religions ne sont peut-être que des dispositifs façonnés par des siècles d'évolution culturelle afin d'envahir rapidement les circuits de nos cerveaux de primates.

Cependant, une énigme demeure. Aucune espèce autre que la nôtre n'a inventé de symboles parlés ou écrits. Chez les chimpanzés, la liste des traits culturels se borne à quelques dizaines d'éléments. Parmi tous les primates, pourquoi notre espèce seule s'est-elle dotée d'une riche dimension culturelle ? J'esquisserai en conclusion quelques pistes de réflexion autour

de cette question fascinante. Deux concepts récents, celui de « théorie de l'esprit » – la capacité d'imaginer ce que pensent nos congénères – et celui d'« espace de travail conscient » – un réseau neuronal où les idées se recombinent en synthèses nouvelles – pourraient contribuer à cerner la singularité culturelle de l'esprit humain.

Au terme de cette analyse, la variabilité culturelle de l'espèce humaine ne nous paraîtra plus si vaste. Peut-être l'impression d'infinie variété des cultures n'est-elle qu'une illusion liée à notre incapacité d'imaginer des formes culturelles autres que celles que notre cerveau nous permet de concevoir. La lecture, invention culturelle récente, appartient depuis des millénaires à l'enveloppe des possibilités accessibles à nos circuits cérébraux. Derrière la diversité apparente des écritures se meuvent des mécanismes neuronaux universels qui révèlent, comme en filigrane, les contraintes de notre nature humaine.

Chapitre premier
Comment lisons-nous ?

Comment fonctionne la lecture ? Le traitement de l'écriture commence dans l'œil. Seul le centre de notre rétine, appelé la fovéa, possède une résolution suffisamment élevée pour reconnaître les détails des lettres. Nous devons donc déplacer notre regard sur la page afin d'identifier, à chaque pause de l'œil, un mot ou deux. Éclatée en milliers de fragments par les neurones de la rétine, la chaîne de lettres doit être reconstituée avant d'être reconnue. Notre système visuel en extrait progressivement le contenu en graphèmes, syllabes, préfixes, suffixes et racines des mots. Entrent enfin en scène deux grandes voies parallèles de traitement : la voie phonologique et la voie lexicale. La première permet de convertir la chaîne de lettres en sons du langage (les phonèmes), l'autre d'accéder à un dictionnaire mental où est stocké leur sens.

« L’existence du texte est silencieuse jusqu’à ce qu’un lecteur le lise. Ce n’est que lorsqu’un œil avisé entre en contact avec les marques laissées sur la tablette que commence la vie active du texte. Tout écrit dépend de la générosité du lecteur. »

Alberto MANGUEL,
Une histoire de la lecture

Comment lisons-nous ? Quelles opérations notre cerveau d’adulte met-il en œuvre afin de transformer des marques sur une tablette en un contenu intelligible ? Au premier abord, l’opération de la lecture semble magique : il nous suffit de poser le regard sur un mot et, sans le moindre effort apparent, notre cerveau nous donne accès à son sens et à sa prononciation. Ce problème n’est pourtant pas simple, puisque les meilleurs logiciels de reconnaissance s’y frottent toujours avec difficulté. À son entrée dans la rétine, le mot est éclaté en mille fragments : chaque portion d’image de la page est reconnue par un photorécepteur distinct. Toute la difficulté consiste ensuite à rassembler ces fragments afin de décoder les lettres dont il s’agit, l’ordre dans lequel elles sont présentées, et le mot dont il est question.

Depuis une trentaine d’années, la psychologie cognitive analyse la mécanique humaine de la lecture. Son objectif est de comprendre quelles recettes ou quels « algorithmes », au sens informatique du terme, un bon lecteur applique au problème de la reconnaissance des mots. Elle s’intéresse donc seulement aux étapes de transformation de l’information, pas aux mécanismes cérébraux qui les sous-tendent.

La psychologie cognitive aborde la question de la lecture comme pourrait le faire un roboticien. Chaque lecteur dispose d’un capteur, l’œil et sa rétine. Les mots s’y affichent sous forme de taches d’ombre et de lumière, qu’il s’agit de décoder sous forme de signes linguistiques

compréhensibles. L'information visuelle doit être extraite, distillée, puis recodée dans un format qui restitue la sonorité et le sens des mots. Nous avons besoin d'un algorithme de décodage, semblable dans son principe à celui d'un logiciel de reconnaissance de caractères, capable de passer des taches d'encre de la page aux mots qu'elle contient. Sans que nous en ayons conscience, notre cerveau réalise une série d'opérations sophistiquées dont les principes commencent seulement à être compris.

L'œil, un capteur imparfait

Tout commence dans la rétine, où viennent se projeter les photons renvoyés par la page. Ce capteur est loin d'être aussi parfait qu'on l'a prétendu. En effet, il n'est pas homogène. Seule la région centrale de la rétine, appelée la fovéa, est riche en cellules photoréceptrices de très haute résolution, les cônes. Cette région, qui occupe environ quinze degrés du champ visuel, est la seule zone de la rétine réellement utile à la lecture. Elle seule capte les lettres avec suffisamment de détails pour les reconnaître. Si ces détails manquent, que ce soit à la suite d'une lésion rétinienne, d'une lésion des aires cérébrales visuelles, ou d'un artifice expérimental qui masque sélectivement la région de la fovéa, la lecture devient impossible[5].

L'étroitesse de la fovéa est la raison principale pour laquelle nous bougeons incessamment les yeux au cours de la lecture. En orientant le regard, nous « scannons » le texte à lire à l'aide de la partie la plus sensible de notre capteur visuel, la seule capable de discriminer finement les lettres. De surcroît, nous ne parcourons pas le texte de façon continue[6]. Au contraire, nos yeux se déplacent par petits mouvements discrets, par saccades. Vous en effectuez actuellement quatre ou cinq par seconde afin d'amener ces mots dans votre fovéa.

Même au sein de la fovéa, l'information visuelle n'est pas représentée partout avec la même précision. Le nombre de capteurs affectés à chaque point du champ visuel décroît progressivement à mesure qu'on s'éloigne du centre du regard. Autrement dit, il y a une perte progressive de la précision du codage visuel. La précision est maximale au centre et diminue vers la périphérie. Nous croyons voir un mot ou même une page dans sa totalité, avec la même précision partout. En réalité, contrairement à un appareil photographique, dont le capteur présente une résolution homogène, notre

capteur oculaire ne perçoit avec précision que l'endroit où notre regard se fixe. Le pourtour se perd dans un flou progressif (figure 1.1)[7].

On pourrait penser, dans ces conditions, que c'est la taille des caractères qui détermine la facilité avec laquelle nous les lisons : les petits caractères seraient plus difficiles à lire que les gros. Il est curieux de constater qu'il n'en est rien. En effet, plus un mot est écrit en gros caractères, plus ceux-ci prennent de place sur la rétine et donc plus les lettres s'écartent vers la périphérie du champ visuel, où même les grosses lettres deviennent difficiles à discerner. Les deux facteurs se compensent presque exactement, en sorte qu'un mot énorme et un mot minuscule sont, du point de vue de la précision rétinienne, essentiellement équivalents. Évidemment, cela n'est vrai que tant que la taille des caractères ne descend pas en dessous de la limite de résolution de notre fovéa. Chez les personnes atteintes d'une cataracte ou d'un glaucome, dont la résolution visuelle est altérée, il est donc logique de recommander la lecture de livres imprimés en gros caractères.

À cause de cette organisation de l'œil, nos capacités de perception ne dépendent que du nombre de lettres que contiennent les mots, et non pas de leur taille absolue[8]. De fait, les saccades oculaires qui permettent la lecture sont approximativement constantes si on les mesure en nombre de lettres parcourues, alors qu'elles varient grandement en taille en fonction de la police de caractère utilisée. Lorsqu'il prépare les saccades, notre cerveau adapte la distance parcourue par l'œil à la taille des caractères, de façon à avancer d'environ sept à neuf lettres à chaque saccade. Cette valeur, étonnamment petite, correspond donc approximativement au nombre de lettres que nous parvenons à traiter au cours d'une fixation du regard.

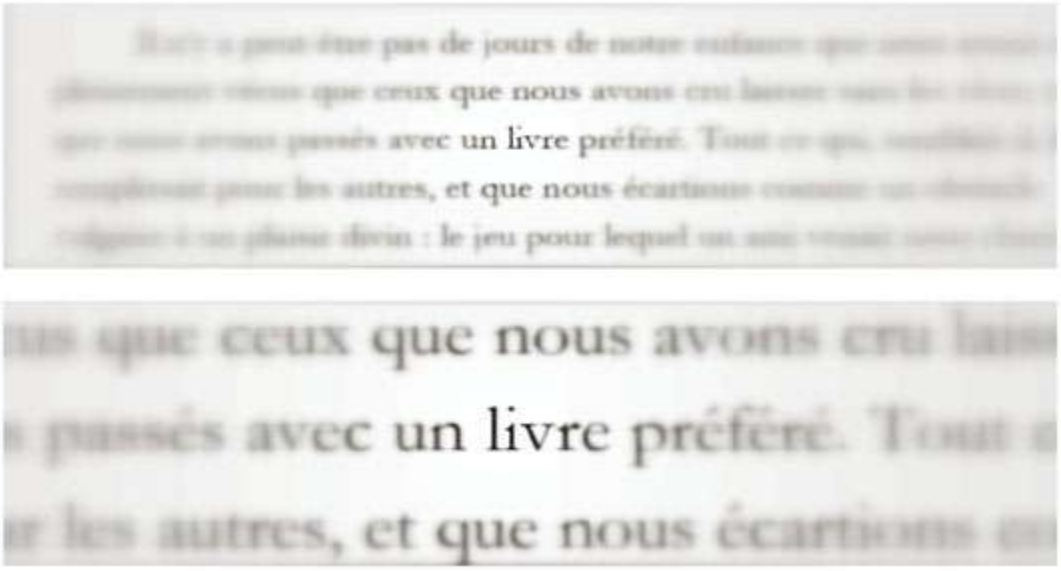


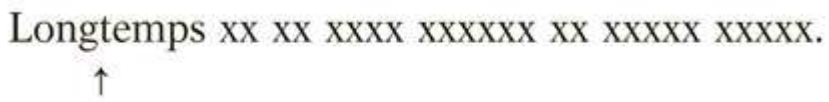
Figure 1.1 L'organisation de notre rétine impose un filtrage sévère aux textes que nous lisons. Ce texte de Marcel Proust (*Sur la lecture*) a été filtré à l'aide d'un algorithme conçu par Sere, Marendaz et Hérault (2000), qui simule l'imprécision croissante de notre perception à mesure que l'on s'éloigne du centre de la rétine, appelée la fovéa. Quelle que soit la taille des caractères, seules les lettres les plus proches du centre sont lisibles. C'est pour cette raison que nous devons déplacer sans cesse notre regard au cours de la lecture, par petits mouvements saccadés. Chaque fois que notre regard se pose, nous ne parvenons à identifier qu'un ou deux mots.

Pour vérifier plus directement ce que nous voyons d'un texte, George W. McConkie et Keith Rayner ont développé une méthode expérimentale que l'on pourrait qualifier de « démon de Descartes ». Dans ses *Méditations métaphysiques*[9], René Descartes imaginait en effet un mauvais génie capable de tromper nos sens :

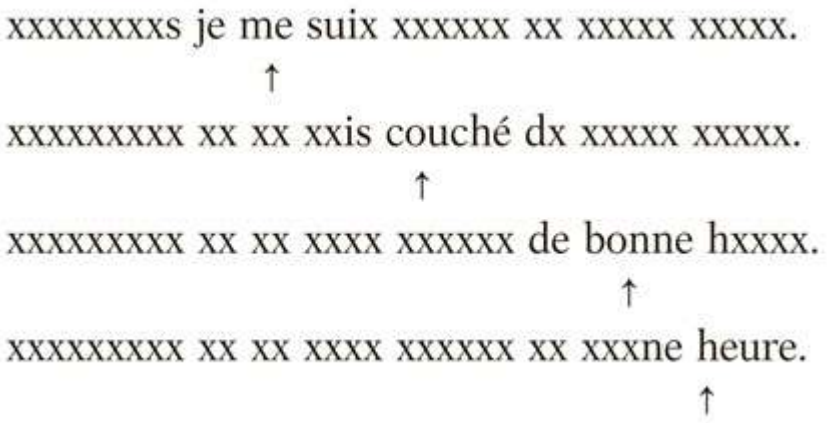
> « Je supposerai donc qu'il y a, non point un vrai Dieu, qui est la souveraine source de vérité, mais un certain mauvais génie, non moins rusé et trompeur que puissant qui a employé toute son industrie à me tromper. Je penserai que le ciel, l'air, la terre, les couleurs, les figures, les sons et toutes les choses extérieures que nous voyons, ne sont que des illusions et tromperies, dont il se sert pour surprendre ma crédulité. Je me considérerai moi-même comme n'ayant point de mains, point d'yeux, point de chair, point de sang, comme n'ayant aucun sens, mais croyant faussement avoir toutes ces choses. »

Le mauvais génie de Descartes, comme l'ordinateur du film *Matrix*, produit un simulacre de réalité en bombardant nos sens de signaux habilement calculés pour créer une illusion de réalité, un décor virtuel dont nous ne pourrions jamais voir l'envers. La méthode de McConkie et Rayner, dite de la « fenêtre mobile », est plus modeste : elle permet de créer une illusion de texte sur un écran d'ordinateur[10]. Elle consiste à équiper un volontaire d'un appareil de détection des mouvements de l'œil et à le coupler à un ordinateur de façon à modifier l'affichage du texte en temps réel. Ainsi peut-on programmer l'ordinateur pour n'afficher que quelques

caractères de part et d'autre du point de fixation du regard, toutes les autres lettres de la ligne étant remplacées par des « x ». À titre d'exemple, la première phrase de *À la recherche du temps perdu* de Marcel Proust apparaîtrait ainsi :



Dès que le regard bouge, l'ordinateur rafraîchit l'écran afin de toujours présenter les lettres adéquates à l'endroit où l'on regarde, et des « x » partout ailleurs :


xxxxxxxxs je me suix xxxxxx xx xxxxx xxxxx.
xxxxxxxxx xx xx xxis couché dx xxxxx xxxxx.
xxxxxxxxx xx xx xxxx xxxxxx de bonne hxxxx.
xxxxxxxxx xx xx xxxx xxxxxx xx xxxne heure.

C'est ainsi que McConkie et Rayner ont fait une découverte remarquable et paradoxale : pour le sujet de l'expérience, cette manipulation est indétectable. Pour peu que l'on laisse suffisamment de lettres correctes de part et d'autre du point de fixation, le lecteur ne s'aperçoit de rien et croit avoir sous les yeux une page normale. En somme, il est aveugle dans une grande partie de son champ visuel et ne le sait pas.

Pourquoi cette étonnante cécité périphérique ? Au moment où il se produit, le changement de lettres n'est pas visible parce qu'il survient au pic de vitesse de l'œil, à un moment où l'image rétinienne est rendue floue par le déplacement. Lorsque le regard se pose, tout a l'air normal : les lettres attendues sont en place face à la fovéa, et le reste n'est de toute façon guère lisible en périphérie du champ visuel. L'expérience de McConkie et Rayner prouve ainsi que nous ne traitons consciemment qu'une toute petite fraction

des entrées visuelles. Si on laisse environ quatre lettres à gauche et quinze lettres à droite, la vitesse de lecture reste identique à celle d'un texte normal[11]. À chaque instant, nous n'extrayons donc que très peu d'informations du texte : le démon de Descartes n'aurait qu'à afficher une vingtaine de lettres par fixation pour nous faire croire que nous avons sous les yeux la totalité d'un volume de Proust !

Encore s'agit-il là d'une surestimation. Nous n'identifions vraiment que de dix ou douze lettres par saccade : trois ou quatre lettres à gauche du centre du regard, et sept ou huit lettres à droite. Au-delà de cette zone, que l'on appelle l'empan de perception visuel des lettres, l'expérience montre que nous ne sommes pratiquement plus sensibles à l'identité des lettres, mais seulement à la présence des espaces qui délimitent le mot suivant : en nous fournissant des indices de longueur, ces espaces nous permettent de préparer la prochaine saccade afin que le regard atterrisse assez près du centre du prochain mot. Peut-être analysons-nous également les toutes premières lettres du mot qui suit – mais les experts continuent de se demander à quel point nous en reconnaissons le sens.

Notre fenêtre de perception d'une page est non seulement réduite, mais asymétrique : chez les lecteurs du français, la perception des lettres est biaisée en faveur de la droite, en sorte que nous percevons environ deux fois plus de lettres à droite de la fixation du regard qu'à gauche. Cette asymétrie provient de la direction de lecture. Chez le lecteur de l'arabe ou de l'hébreu, dont le regard parcourt la ligne de la droite vers la gauche, l'asymétrie de l'empan visuel s'inverse[12]. Dans d'autres langues telles que le chinois, où la densité des caractères est plus élevée, les saccades sont plus courtes et l'empan est réduit d'autant. Chaque lecteur adapte son exploration visuelle en fonction de la langue qu'il pratique.

En appliquant la même méthode, on peut également estimer quelle durée d'exposition suffit à identifier un mot. Pour mesurer cette durée, il suffit de programmer l'ordinateur afin qu'il remplace toutes les lettres, même celles qui apparaissent dans la fovéa, par des « x » après un temps d'exposition donné. On s'aperçoit alors qu'il suffit de 50 millisecondes de présentation pour que la lecture progresse quasiment normalement. Cela ne signifie pas que toutes les opérations mentales de lecture soient terminées après un vingtième de seconde. Nous verrons plus loin que ces opérations s'enchaînent dans le temps pendant au moins une demi-seconde après la

présentation d'un mot. Cependant, la prise initiale d'informations visuelles est extraordinairement brève.

En résumé, les contraintes que l'œil impose à la lecture sont considérables. La structure de notre capteur visuel nous oblige à parcourir les phrases de façon saccadée, en déplaçant le regard tous les deux ou trois dixièmes de seconde. La lecture n'est qu'une succession d'aperçus du texte, qui est appréhendé presque mot à mot. Si les petits mots grammaticaux comme les auxiliaires, les pronoms ou les articles sont parfois esquivés, presque tous les autres mots essentiels au contenu de la phrase, tels que les noms, les verbes, les adjectifs ou les adverbes, doivent être fixés du regard.

Ces contraintes sont inamovibles : voilà une première preuve que notre organisation biologique contraint nos apprentissages culturels. Il est certes possible de s'entraîner à optimiser nos saccades visuelles, mais la plupart des bons lecteurs, qui lisent aux alentours de 400 à 500 mots par minute, sont déjà proches de l'optimalité : avec le capteur rétinien dont nous disposons, il n'est sans doute pas possible de faire beaucoup mieux. On peut démontrer que ce sont bien les saccades oculaires qui limitent notre vitesse de lecture[13]. En effet, si l'on supprime la nécessité de bouger les yeux en présentant les mots sur ordinateur, l'un après l'autre, au point précis où se fixe le regard, un bon lecteur peut atteindre des vitesses de lecture faramineuses : 1 100 mots par minute en moyenne, 1 600 pour les meilleurs – soit trois à quatre fois plus que la lecture normale, et environ un mot toutes les 40 millisecondes ! Avec cette méthode de « présentation séquentielle visuelle rapide », l'identification et la compréhension restent satisfaisantes, ce qui montre bien que la durée de ces étapes centrales n'est pas contraignante dans la lecture normale. Peut-être cette présentation informatisée représente-t-elle l'avenir de la lecture, dans un monde où les écrans remplacent progressivement le papier ?

Quoi qu'il en soit, tant que le texte reste présenté en pages et en lignes, c'est bien son acquisition par le regard qui ralentit la lecture et constitue une limite incontournable. Les méthodes de lecture rapide, qui prétendent faire atteindre des taux de 1 000 mots par minute ou plus encore, sont donc à considérer avec le plus grand scepticisme[14]. Sans doute est-il possible d'élargir un peu son empan visuel afin de réduire le nombre de saccades. On peut également apprendre à éviter les régressions, ces moments où le regard revient sur des mots qu'il vient de parcourir. Mais on ne saurait

dépasser les limites physiques de l'œil, sous peine de sauter des mots et donc de perdre le fil du texte. Souvenons-nous de l'expérience de Woody Allen :

> « La semaine dernière, j'ai suivi un cours de lecture rapide – et ça a marché ! Hier, j'ai lu tout *Guerre et Paix* en une heure. C'est une histoire de Russes… »

Les mille et une figures des caractères

> « — Tu sais donc lire, Lubin ?
> — Oui, je sais lire la lettre moulée ; mais je n'ai jamais su apprendre à lire l'écriture. »
>
> MOLIÈRE,
> *Georges Dandin*

Les déboires du valet Lubin, que décrit Molière, illustrent bien le problème de perception visuelle que pose la lecture. Lire, c'est savoir identifier tous les mots, qu'ils soient écrits en caractères d'imprimerie (les « lettres moulées ») ou manuscrits, en majuscules ou en minuscules, et dans toutes les tailles de police. Il s'agit de repérer ce qui ne varie pas – la suite de lettres – en dépit des mille et une figures que peuvent prendre les caractères. C'est ce que l'on appelle le problème de l'« invariance perceptive ».

Examinons, très concrètement, comment la question de l'invariance se pose à notre cerveau lorsqu'il fixe un mot. Sur notre rétine, le mot excite une fraction de nos photorécepteurs. De quel mot s'agit-il ? L'identifier serait aisé si les mots étaient toujours écrits dans la même police, à la même taille et la même place. Il suffirait alors d'établir une liste des cellules rétiniennes activées pour savoir quel mot est présenté – de la même manière qu'une image en noir et blanc est définie, sur un écran d'ordinateur, par la liste de ses pixels allumés. Mais la reconnaissance des mots est évidemment bien plus complexe dans la mesure où des dizaines d'images différentes peuvent correspondre au même mot, selon qu'il est écrit en minuscules ou en majuscules, tracé à la main ou imprimé (figure 1.2). Il faut donc parvenir à une reconnaissance *invariante* en dépit de la grande variété des formes de surface que peuvent prendre les mots.

Figure 1.2 La grande prouesse de notre système de reconnaissance des mots consiste à satisfaire deux exigences qui semblent contradictoires : négliger les variations inutiles, même si elles sont massives, tout en amplifiant les différences pertinentes, même si elles sont très petites. Sans que nous en ayons conscience, notre système visuel compense automatiquement des variations énormes de taille ou de police des caractères. Il nous donne accès à l'identité abstraite du mot quelle qu'en soit la représentation graphique. Cependant, notre système visuel prête également attention à de minuscules changements de forme. Il suffit qu'un seul trait vienne à changer, comme la boucle de la lettre « e » dans les mots « deux » et « doux », pour que toute la chaîne de traitement du mot bascule et entraîne avec elle la prononciation et le sens.

Une première forme d'invariance porte sur la taille des lettres. Au sein d'une même page de journal cohabitent les gros titres accrocheurs et les articles écrits en petits caractères. La taille des lettres peut varier d'un facteur cinquante sans que notre lecture en soit affectée. Ces variations ne sont, après tout, pas pires que celles que nous subissons lorsque nous reconnaissons un visage situé à cinquante centimètres ou à vingt-cinq mètres de distance – notre système visuel résiste sans effort à de vastes changements d'échelle.

Une deuxième forme d'invariance concerne la position des mots. Lorsque notre regard se déplace au cours de la lecture, le centre de notre rétine atterrit en général légèrement à gauche du centre des mots. Cependant, il ne se pose pas toujours exactement au même endroit. Si le mot n'est pas trop long, peu importe que notre regard se fixe sur sa première ou sur sa dernière lettre, cela ne nous empêche pas de le reconnaître. Nous parvenons même, dans une certaine mesure, à lire les mots présentés en périphérie du champ visuel, du moment que la taille des lettres est suffisamment importante pour compenser la perte de résolution. Ainsi, notre système visuel dispose-t-il de mécanismes qui compensent simultanément les changements de taille et de position des mots.

Une troisième forme d'invariance concerne la forme des caractères. Maintenant que les logiciels de traitement de texte se sont répandus dans tous les foyers, toute une technologie autrefois réservée aux typographes est

devenue familière à de nombreux lecteurs. Chacun sait qu'il existe de nombreux assortiments de caractères appelés « polices » ou « fontes ». Ce terme évoque les temps anciens où chaque caractère devait être fondu en métal avant d'être utilisé dans la presse. Chaque police dispose également de deux sortes de caractères ou « casses », les MAJUSCULES et les minuscules. À l'origine, la casse était une boîte plate divisée en de nombreux compartiments où l'on rangeait les caractères : le « haut de casse » était occupé par les majuscules et le « bas de casse » par les minuscules. Enfin, il est souvent possible de choisir l'épaisseur des traits ou « graisse » (on parle de **caractères gras)**, l'inclinaison des caractères (écriture en *italique*), le soulignement, ou n'importe quelle **combinaison** *de* ***ces options***. Encore s'agit-il là de variations bien calibrées, que l'usage de l'imprimerie a rendues parfaitement reproductibles. L'écriture manuscrite ajoute évidemment une dimension encore plus grande de variabilité et d'ambiguïté.

Confronté à toutes ces variations, notre système visuel doit, s'il veut parvenir à lire, placer dans la même catégorie des formes remarquablement différentes. Une partie du problème peut certes être résolue par des moyens visuels simples. La voyelle « o », par exemple, se distingue aisément par sa forme ronde et close, quelles que soient sa taille et sa police. Un détecteur visuel de la lettre « o » n'est donc pas difficile à construire. Mais d'autres lettres soulèvent des difficultés particulières. Bien qu'il nous paraisse évident que les formes « r », « R », « ɾ » et « *r* » représentent la même lettre, un examen attentif montre que cette association est parfaitement arbitraire – pourquoi la forme « e » n'aurait-elle pas été aussi appropriée pour représenter la minuscule de la lettre « R » ? Seuls les accidents de l'histoire en ont décidé ainsi. Au cours de l'apprentissage de la lecture, nous devons apprendre, non seulement que les lettres représentent les sons du langage, mais également que de multiples formes, sans lien particulier entre elles, peuvent représenter la même lettre. Cette connaissance abstraite résulte probablement de l'existence de détecteurs de lettres, des neurones capables de repérer l'identité des lettres derrière des formes de surface très différentes. L'expérience montre qu'un peu d'entraînement suffit PoUr dÉcOdEr, À uNe ViTeSsE pRaTiQuEmEnT nOrMaLe, DeS pHrAsEs dOnT

LeS LeTtReS sOnT aLtErNaTiVeMeNt ÉcRiTeS eN mAjUsCuLeS eT eN mInUsCuLeS[15]. Dans l'appareil de McConkie et Rayner, on peut même modifier cette alternance de casse à chaque fois que l'œil se déplace – sans que le lecteur s'aperçoive du moindre changement[16] ! Dans notre expérience quotidienne de lecteur, nous ne rencontrons jamais de mots en présentation alternée. Cependant, le processus de normalisation des lettres est tellement efficace qu'il résiste sans difficulté à de telles manipulations.

Au passage, ces expériences démontrent que la forme globale du mot ne joue pratiquement aucun rôle dans la lecture. Si nous sommes capables de reconnaître l'identité des mots « trois », « TROIS » et « TrOiS », c'est que notre système visuel ne prête aucune attention au contour du mot ni aux lettres montantes ou descendantes : il ne s'intéresse qu'à la reconnaissance invariante de la suite de lettres.

L'amplification des petites différences

Nous venons de voir que le système visuel d'un bon lecteur est d'une efficacité redoutable pour filtrer et rejeter quantité de variations qui ne sont pas pertinentes pour la lecture, telles que la différence entre « R » et « r ». Cependant, il serait trop simple de penser qu'il se contente de simplifier les formes. Au contraire, il doit fréquemment préserver et même amplifier des détails, parfois minuscules, qui différencient deux mots très proches. Considérons les mots « deux » et « doux ». Nous accédons immédiatement à leur sens et à leur prononciation, mais c'est seulement en nous penchant attentivement sur leur forme écrite que nous prenons conscience qu'ils ne diffèrent l'un de l'autre que de quelques taches d'encre. Notre système visuel est sensible à la minuscule différence entre les mots « deux » et « doux », et l'amplifie d'étape en étape afin d'accéder, en bout de chaîne, à des sons et à des sens radicalement différents. Dans le même temps, il ne prête guère attention à des différences bien plus grandes, comme celles qui séparent les mots « deux » de « DEUX ».

Comme l'invariance de casse, cette capacité d'attention aux détails pertinents résulte d'années d'apprentissage. Le même lecteur qui voit immédiatement la différence entre les lettres « e » et « o », et l'absence de différence entre « a » et « *a* », ignore probablement que ח et ה sont des

lettres hébraïques différentes, ce qui paraîtra évident à n’importe quel lecteur de l’hébreu.

Chaque mot est un arbre

Comment notre système visuel résout-il le problème de la reconnaissance invariante des mots ? Nous nous pencherons en détail sur l’organisation cérébrale des aires visuelles au chapitre suivant, mais il nous faut d’ores et déjà imaginer une arborescence hiérarchique qui réoriente et canalise progressivement le flot d’activité neuronale issu des aires visuelles. Des formes visuelles initialement très proches comme « deux » et « doux », analysées par une hiérarchie de détecteurs de plus en plus raffinés, sont progressivement triées, séparées et rattachées à des significations différentes. Inversement, des formes comme « deux » et « DEUX », composées de traits visuels entièrement différents, sont initialement représentées par des neurones distincts de l’aire visuelle primaire, mais sont ensuite progressivement recodées aux niveaux suivants. Des détecteurs de formes reconnaîtront la similarité du « x » et du « X ». D’autres détecteurs de lettres, plus abstraits, seront capables de classer les formes « e » et « E » comme deux instances de la même lettre. Finalement, en dépit des différences initiales, le système visuel du lecteur convergera vers la même représentation abstraite, l’essence même de la suite de lettres « DEUX », indépendamment de leur forme particulière – un code abstrait capable d’orienter le reste du cerveau vers la prononciation et le sens de cette chaîne de caractères.

À quoi ressemble ce code abstrait ? S’agit-il juste d’une liste de lettres, D-E-U-X, sans structure particulière ? Non. On s’oriente aujourd’hui vers l’hypothèse d’une représentation hiérarchique, où chaque mot écrit serait représenté par un arbre, dans lequel les lettres se regroupent en unités, elles-mêmes imbriquées dans des groupements de taille plus élevée – un peu comme un corps humain peut être représenté par l’agencement de ses parties, jambes, corps, tête, elles-mêmes constituées d’éléments plus simples.

Quelles sont donc les parties pertinentes d’un mot ? Disséquons ensemble le mot « déboutonner », par exemple. Nous y trouvons un préfixe « dé » et un suffixe « ner » qui encadrent et nuancent l’élément central, le

mot au sein du mot, la racine « bouton ». Tous ces éléments s'appellent des « morphèmes » : ce sont les plus petites unités de sens que contiennent les mots. L'assemblage des morphèmes détermine le sens du mot. La décomposition en morphèmes permet même de comprendre des mots que nous n'avons jamais lus, comme « déboutonnerions » ou « retrocher » (nous comprenons qu'il s'agit de refaire l'action de « trocher », même si le sens de celle-ci nous échappe). Il existe des langues que l'on appelle « agglutinantes » ou « polysynthétiques », comme le turc ou le finnois, dans lesquelles l'accumulation des morphèmes permet de composer des mots très longs, qui véhiculent autant d'informations qu'une phrase de la langue française. Dans ces langues, mais également dans la nôtre, la décomposition en morphèmes constitue une étape essentielle que le système visuel se doit d'accomplir avant d'accéder au sens.

De nombreuses données expérimentales démontrent que, dans un temps très bref, et même inconsciemment, notre système visuel extrait les morphèmes des mots. Par exemple, si l'on vous présente très brièvement, sur un écran d'ordinateur, le mot « fillette », vous allez ensuite prononcer plus rapidement le mot « fille » lorsque vous le rencontrerez ultérieurement. La présentation du mot « fillette » semble préactiver le morphème [fille] et ainsi faciliter sa reconnaissance ultérieure. On parle d'effet d'« amorçage », car la lecture d'un mot « amorce » la reconnaissance des mots reliés, un peu comme on amorce une pompe. Cet effet d'amorçage ne nécessite pas que les deux mots se ressemblent sur le plan visuel : des mots qui se ressemblent peu mais qui partagent un même morphème, tels que « lu » et « lisons », peuvent s'amorcer l'un l'autre, tandis que des mots qui se ressemblent beaucoup mais n'ont aucun rapport, comme « trente » et « rente », ne s'amorcent pas.

L'amorçage ne survient pas non plus au niveau du sens, car des mots comme « baguette » et « bague » peuvent s'amorcer même s'ils n'ont aucune relation de sens[17]. Ce qui semble compter, c'est la plausibilité de la décomposition de la chaîne de lettres en morphèmes : « bague » pourrait être la racine de « baguette », car « ette » est un suffixe fréquent, tandis que « rente » ne saurait être un sous-élément de « trente », car le « t » initial n'est pas un préfixe du français. Tout se passe donc comme si notre système visuel faisait un rapide pari sur la décomposition présumée du mot en morphèmes. Il dissèque le mot « baguette » en [bague]+[ette] en espérant

que cela sera utile aux opérateurs suivants chargés d'en calculer le sens[18]. Et tant pis, bien sûr, si cela ne fonctionne pas à tout coup – une baguette n'est pas une petite bague, ni une mandarine la femme d'un mandarin, ni un concubin un imbécile sous la coupe de Fidel Castro ! Ces erreurs seront rectifiées plus tard, par les autres niveaux de décomposition du mot.

Continuons donc à déshabiller le mot « déboutonner ». Le morphème « bouton » lui-même n'est pas indivisible. Il se compose de deux syllabes [bou] et [ton], elles-mêmes composées chacune d'une consonne et d'une voyelle : [b] [ou] [t] [on]. On voit poindre ici une unité nouvelle, essentielle à la lecture : le « graphème ». Il s'agit d'une lettre ou d'une suite de lettres qui représente une seule catégorie élémentaire du langage parlé, un « phonème ». Dans de nombreuses langues, certains phonèmes, comme le son *ou*, s'écrivent avec plusieurs lettres[19]. Notre système visuel a appris à traiter ces groupes de lettres comme des unités à part entière, au point que nous ne voyons pratiquement plus les lettres qui les composent.

Tentons une expérience simple : essayez de détecter, parmi les mots suivants, ceux qui contiennent la lettre « a » :

barrage
métal
dépôt
eau
chat
polo
réchauffer

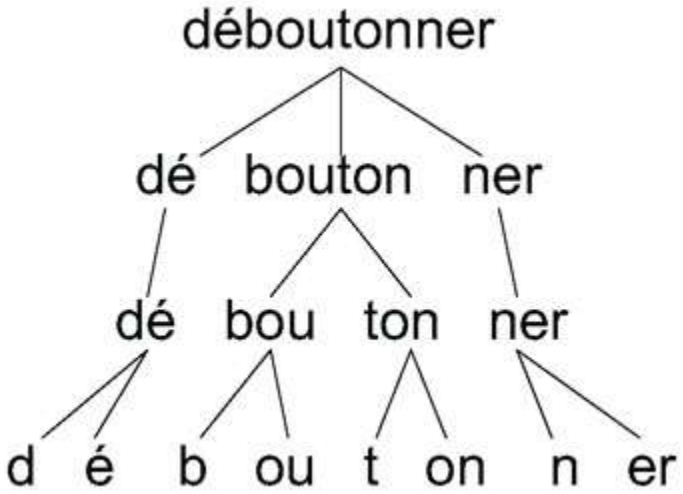
Avez-vous ressenti un léger ralentissement pour les mots « eau » et « réchauffer », où la lettre « a » est enchâssée dans un graphème complexe ? L'étude des temps de réponse dans de telles situations montre clairement que notre cerveau ne s'arrête pas au niveau de la lettre, mais regroupe automatiquement ces dernières en graphèmes appropriés – ce qui rend opaque la présence de la lettre « a » dans des groupes de lettres comme « eau » qui forment une unité de lecture[20].

De même, les graphèmes se regroupent en syllabes. Voici une démonstration simple que notre système visuel est sensible aux syllabes. Vous allez voir des mots de cinq lettres, essayez de vous concentrer exclusivement sur la lettre centrale et de dire à haute voix si elle est écrite en caractères normaux ou gras :

Liste 1 : CO**LZA** **PAL**ET **BO**NDI LAP**IN**
Liste 2 : **VOD**KA RA**DIN** CA**RTE** **MI**NET

Avez-vous ressenti une plus grande difficulté pour la première liste que pour la seconde ? Dans la première liste, le coloriage en caractères gras ne respecte pas la frontière des syllabes – le L de **PAL**ET, par exemple, apparaît en gras alors que le reste de la syllabe ET est en caractères simples. La confusion qui en résulte induit un ralentissement mesurable de nos réponses[21]. Elle témoigne que, même lorsque cela nous gêne et que nous souhaiterions l'éviter, notre système visuel ne peut pas s'empêcher de décomposer automatiquement les mots en constituants élémentaires.

La nature exacte de ces constituants reste un sujet de recherche très actuel. Il est probable que de multiples niveaux d'analyse coexistent : la lettre au plus bas niveau, la paire de lettres ou « bigramme » ensuite (nous en reparlerons), puis le graphème, la syllabe, le morphème et enfin le mot. À l'issue du traitement visuel, le mot écrit ressemblerait alors à un arbre, une arborescence buissonnante et partiellement hiérarchique dont les feuilles sont les lettres et les branches des morceaux de mots de taille croissante :



Réduite à son squelette, débarrassée de tous ses détails inutiles de fonte, de casse, de taille ou de position, la chaîne de caractères a été analysée en ses composants les plus élémentaires. Ceux-ci vont maintenant pouvoir être utilisés par le reste du cerveau, tant pour en calculer le son que pour accéder à leur sens.

La voix muette

« … Cet art ingénieux de peindre la parole et de parler aux yeux… »

Georges DE BRÉBEUF,
Pharsale de Lucain

Lorsqu'il rend visite à saint Ambroise, alors évêque de Milan, saint Augustin observe un phénomène si curieux qu'il le juge digne d'être rapporté dans ses mémoires :

> « Quand [saint Ambroise] lisait, ses yeux parcouraient la page dont son esprit perçait le sens, mais sa voix restait muette et sa langue immobile. N'importe qui pouvait l'approcher librement et les visiteurs n'étaient en général pas annoncés, si bien que souvent, lorsque nous venions à lui rendre visite, nous le trouvions occupé à lire ainsi en silence, car il ne lisait jamais à haute voix[22]. »

Au milieu du VII^e^ siècle, le théologien Isidore de Séville s'émerveille également de ce que « les lettres ont le pouvoir de nous communiquer silencieusement les propos des absents ». À l'époque, en effet, il est courant de lire le latin à voix haute, en remuant les lèvres. L'oralisation est à la fois une convention culturelle et une nécessité : confrontés à des pages où les mots ne sont pas séparés les uns des autres, dans une langue qu'ils connaissent mal, la plupart des lecteurs doivent ânonner comme des enfants. Voilà pourquoi l'efficace méthode directe de saint Ambroise les étonne, alors que l'expérience nous en est aujourd'hui familière : nous lisons sans articuler les sons.

Cependant, lorsque nous pratiquons ainsi la lecture mentale, passons-nous vraiment directement des mots écrits à leur signification sans accéder à leur prononciation ? Ou bien transformons-nous toujours, sans en avoir nécessairement conscience, les lettres en sons, puis les sons en sens ? Tel est le grand débat des voies de la lecture qui a divisé, pendant près de trente ans, la communauté scientifique. Pour les uns, le passage par le son est essentiel – le langage écrit, après tout, n'est qu'un sous-produit du langage oral et nous devrions donc toujours passer par la voie des sons, ou *voie phonologique*, avant d'en retrouver le sens. Pour les autres, le passage par la phonologie n'est qu'une étape initiale, caractéristique du lecteur débutant. Chez le bon lecteur, la lecture efficace passerait par une voie directe ou *voie lexicale*, en ligne directe depuis la chaîne de lettres jusqu'au sens du mot.

Aujourd'hui, un consensus se dégage : chez l'adulte, les deux voies de lecture existent et sont activées simultanément. Nous disposons tous d'une voie directe d'accès aux mots, qui nous évite de les prononcer mentalement avant de les comprendre. Néanmoins, chez le lecteur expert, la sonorité des mots continue d'être utilisée, même si nous n'en avons pas toujours conscience. Il ne s'agit pas d'articulation – nous n'avons pas besoin de remuer les lèvres ni même de préparer un mouvement de la bouche. Mais, à un niveau plus profond de notre cerveau, des informations sur la prononciation des mots sont automatiquement activées. Les deux voies de traitement des mots, la voie lexicale et la voie phonologique, fonctionnent donc en parallèle, l'une soutenant l'autre.

Les preuves de l'accès au son ne manquent pas. Supposons, par exemple, qu'on vous présente diverses chaînes de caractères et qu'on vous demande de les classer selon qu'elles forment des mots français ou non. Insistons bien : il s'agit uniquement de décider si, sur le plan visuel, les lettres forment un mot. Allez-y :

lapin
matrocle
cuspir
coquet
chèze
frensser
maut

On ne manque pas de percevoir un ralentissement lorsque les lettres, sans réellement composer un mot, se prononcent comme tel – comme « chèze », « frensser » ou « maut[23] ». Cela suppose, évidemment, qu'on les ait prononcées mentalement, même si on ne le souhaite pas.

Cette capacité de lecture mentale devient essentielle lorsque nous lisons un mot pour la première fois. Au départ, nous n'avons aucune possibilité d'accès direct au sens, puisque nous n'avons aucune expérience de l'orthographe de ce mot. Cependant, nous pouvons le lire, c'est-à-dire le décoder en sons intelligibles et, par cette voie indirecte, le comprendre. La voie phonologique est donc la seule utilisable lorsque nous apprenons à lire des mots nouveaux. Raymond Queneau, en virtuose des mots, l'avait bien compris et s'est plusieurs fois servi du procédé dans ses *Exercices de style*. Rappelons que le livre raconte, dans 99 styles distincts, une anecdote

insipide sur un homme rencontré par hasard dans un autobus. Voici donc « Poor lay Zanglay », à lire mentalement avec l'accent *british* !

> « Ung joor vare meedee ger preelotobus poor la port Changparay. Eel aytay congplay, praysk. Jer mongtay kang maym ah lar jer, ay ger vee ung ohm ahvayk ung long coo ay ung chahrpo hangtooray dunn saughrt der feessel trayssay. Sir mirssyer sir mee ang caughlayr contrer ung ingdeeveeduh kee luhee marshay suhr lay peehay, puhee eel arlah sarsswar. »

En lisant Queneau, nous retrouvons une forme de lecture dont nous avions peut-être oublié l'existence, mais sur laquelle tant d'écoliers butent pendant des mois : le décodage, la lente transformation d'une suite de lettres totalement nouvelle (« ung joor vare meedee ») en sons qui soudain, comme par miracle, deviennent des mots intelligibles, comme si le texte nous parlait au creux de l'oreille. Il y est clair que, lorsque nous sommes confrontés à des chaînes de caractères nouvelles, nous n'avons d'autre solution que d'en décoder le son.

Cependant, qu'en est-il des mots de tous les jours, ceux que nous avons lus des milliers de fois déjà ? Nous n'avons plus la sensation de les décoder avec lenteur, en les articulant mentalement. Devons-nous toujours accéder à leur prononciation ? Plusieurs expériences suggèrent que nous y sommes contraints, que nous le souhaitions ou non. Par exemple, supposons que l'on vous demande de classifier, le plus rapidement possible, des mots courants selon qu'ils sont ou non des objets. Vous devriez pouvoir vous focaliser exclusivement sur le sens des mots et, s'il existe bien une voie directe, négliger totalement leur prononciation. Essayez donc :

table
chaise
nage
pelle
pensée
saut

L'expérience montre un net ralentissement et un important taux d'erreurs pour les mots comme « saut » qui se prononcent comme un mot de la catégorie recherchée (un seau)[24]. Mais comment pourrions-nous reconnaître cette homophonie si nous n'accédions pas à leur prononciation ? C'est la conversion intérieure en phonèmes, la « voix muette » de saint Augustin, qui cause cette erreur. Notre cerveau ne peut s'empêcher de transformer les lettres « s-a-u-t » en sons, puis d'associer ces sons à un sens – qui n'est pas toujours le bon lorsque les mots sont, comme

celui-ci, homophones d'un mot plus fréquent. C'est évidemment ce passage irrépressible des lettres au son et du son au sens qui faisait pouffer de rire les écoliers lorsque, en leçon de français, ils se passaient sous le manteau certains vers regrettables de Corneille[25] :

> « Plus le désir s'accroît, plus *l'effet se recule* » (*Polyeucte*, 1642).
>
> « Car c'est ne pas régner qu'être deux *à régner* » (*La Mort de Pompée*, 1644).
>
> « Je suis *romaine, hélas* ! puisque mon *époux l'est* » (*Horace*, première version, modifiée par l'auteur en 1656).

Il existe d'autres preuves plus rigoureuses de l'accès au son. Elles sont issues de la méthode d'amorçage : on présente très brièvement un mot ou un fragment de mot, par exemple « NERT », que l'on suit immédiatement d'un autre mot, par exemple « nerf ». Dans cet exemple, les deux chaînes de caractères partagent trois lettres sur quatre, et elles se prononcent de la même manière. Ces deux facteurs influencent-ils la vitesse de lecture ? Le fait d'avoir déjà visionné une partie du mot « nerf » avantage-t-il le sujet ? Lui permet-il, par exemple, de décider que ce mot appartient au lexique du français avec une rapidité plus grande que si la première chaîne de caractères n'a aucun rapport avec la seconde (par exemple lorsque le mot « nerf » est précédé de « TAVE ») ? Plus crucialement, une partie de cette facilitation est-elle imputable au fait que la première chaîne de lettres (« NERT ») se prononce comme la seconde (« nerf ») ?

L'expérience montre qu'il existe effectivement deux niveaux d'amorçage, l'un orthographique, l'autre phonologique. Tout d'abord, on observe une facilitation simplement liée au nombre de lettres partagées, et qui s'observe même si les deux chaînes de caractères ne se prononcent pas de la même manière (par exemple lorsque « NERG » est suivi de « nerf »). Cependant, on trouve également une facilitation supplémentaire liée au partage des mêmes sons (lorsque « NERT » est suivi de « nerf »). En manipulant l'intervalle de temps entre l'amorce « NERT » et la cible « nerf », on constate que le cerveau, comme on pourrait s'y attendre, prend moins de temps pour reconnaître les lettres que pour en calculer la prononciation. Il suffit de présenter l'amorce pendant 20 ou 30 millièmes de seconde pour qu'apparaisse un avantage orthographique, au niveau des lettres, mais il faut environ 40 millièmes de seconde supplémentaires pour que se produise la transformation en sons et qu'émerge un avantage au niveau de la prononciation[26].

Ainsi peut-on suivre, indirectement, l'avancée progressive de l'information dans le cerveau depuis les traits sur la rétine jusqu'à leur transformation en lettres et en sons. L'accès à la sonorité des mots se produit très rapidement, à notre insu, par une voie de conversion rapide des graphèmes en phonèmes.

Les limites du son

La lecture muette est une étape automatique de la lecture. Aucun lecteur, même extrêmement averti, ne peut s'empêcher de convertir inconsciemment les lettres en sons, en quelques dizaines de millisecondes. Cependant, cette étape est-elle indispensable ? Devons-nous toujours accéder d'abord au son, puis ensuite, sur la base de cette entrée auditive reconstruite, en récupérer le sens ? Il semble bien que non et que l'accès à la signification puisse également survenir en parallèle par une voie directe, de la chaîne de lettres vers son sens.

Imaginons en effet un lecteur qui en serait réduit à passer par la prononciation des mots. Comment parviendrait-il à distinguer des mots homophones comme « sot », « seau », « sceau » et « saut » ? Le fait même que nous puissions, presque instantanément, accéder au sens de ces mots prouve bien que nous ne nous contentons pas d'en calculer la prononciation – nous en levons également l'ambiguïté en allant droit au sens. Comment pourrions-nous, autrement, apprécier les vers délicats d'André de Richaud[27] :

> « Minuit vint.
> Minuit disparut.
> Minuit dix parut.
> Minuit vingt. »

Il s'agit là de vers « holorimes », qui riment dans leur totalité. Si nous ne disposions que de la voie de conversion des lettres en sons, nous ne devrions pas être capables de les comprendre. Nous devrions seulement parvenir à les prononcer, puis demeurer perplexes devant leurs multiples sens. L'œuvre du grand humoriste Alphonse Allais, spécialiste du vers holorime et du jeu de mots en tout genre, suffit à réfuter cette théorie.

> « Ah, vois au pont du Loing, de là, vogue en mer, Dante !
> Hâve oiseau pondu loin de la vogue ennuyeuse. »
> (La rime n'est pas riche, disait Allais, mais j'aime mieux cela que la trivialité !)

Il y a un second problème pour les théories purement phonologiques de la lecture. C'est que le passage des lettres aux sons, la « conversion graphème-phonème » comme l'appellent les spécialistes, est loin d'être une opération élémentaire et dépourvue d'ambiguïté. Elle est souvent impossible sans l'aide d'informations supplémentaires. Considérez le mot « femme ». Il vous paraît évident qu'il se prononce *fam* et qu'il rime avec « lame », « rame » ou « flamme ». Mais comment le savez-vous ? Pourquoi « femme » ne rime-t-il pas avec « flemme » ou « lemme » ? Pourquoi la lettre « e » ne s'y prononce-t-elle pas *é* comme dans « féminisme » ou dans « féminité » ? Il n'y a pas de règle – seulement un mot à la prononciation hautement irrégulière, tellement inhabituelle en fait qu'on ne voit pas comment il serait possible de la recouvrer sans savoir, d'abord, de quel mot il s'agit.

L'anglais, plus encore que le français, est truffé d'irrégularités qui compliquent la lecture. Les mots que William Shakespeare, dans *Peines d'amour perdues*, fait dire au pédant Holopherne attestent que ce décalage entre l'écrit et l'oral ne date pas d'hier :

> « J'abhorre ces fantaisies fanatiques, ces compagnons insociables et pointus, ces bourreaux de l'orthographe qui, par exemple, prononcent *dout* au lieu de *doubt* ; *det*, *d*, *e*, *t* au lieu de *debt*, *e*, *b*, *t* ; qui lisent *caf* pour *calf*, *haf* pour *half* ; pour qui *neighbour* devient *nebour*, et pour qui *neigh* s'abrège en *né*. Cela est *abhominable*, mot que ces faquins prononceraient *abominable*. C'est à frapper un homme d'insanité[28]. »

L'anglais comme le français sont effectivement des langues abominablement irrégulières. George Bernard Shaw aimait à souligner qu'en anglais le mot *fish* pouvait s'écrire « ghoti » : le son *f* peut s'écrire gh comme dans *enough*, le son *i* se dénoter o comme dans *women*, et le son *sh* s'écrire ti comme dans *notion*[29] ! De même, en français, le mot *cap* pourrait-il s'écrire « cheb » : « ch » comme dans *chorale*, « e » comme dans *femme*, et « b » comme dans *absurde*…

Il va de soi que ces exemples humoristiques sont extrêmes. En réalité, aucun lecteur averti n'aurait l'idée de prononcer « cheb » comme *cap*. Les lettres « eb » se prononcent toujours *eb* – le « b » ne se prononce pratiquement jamais *p*, sauf dans certains contextes où il est suivi d'un s. La prise en compte du contexte des lettres conduit à identifier des régularités de plus haut niveau, des « métarègles » qui permettent souvent de reconstruire la prononciation des mots. Il n'empêche que les exceptions sont suffisamment nombreuses – « oignon » et « doigt », « fille » et

« ville », « cerf » et « serf », « chœur » et « chou », « monsieur » et « monstrueux » – pour jeter un doute sérieux sur la possibilité même d'une lecture qui passerait seulement par le son. Pour les mots les plus irréguliers, la récupération du son, loin d'être à l'origine de la lecture, en est souvent le résultat : c'est seulement après avoir reconnu le mot « monsieur » que nous pouvons en récupérer la prononciation, et non l'inverse.

La logique cachée de l'orthographe

Pourquoi la langue française conserve-t-elle une orthographe d'une telle complexité ? Nos amis italiens ne rencontrent pas les mêmes difficultés. Leur langue est infiniment plus transparente : à chaque lettre ne correspond qu'un son et un seul, de sorte qu'il n'existe quasiment pas de mots irréguliers en italien, et que quelques mois d'apprentissage suffisent à lire pratiquement tous les mots. L'avantage est considérable : non seulement les scores de lecture des enfants italiens sont en avance de plusieurs années sur ceux des nôtres, non seulement ils économisent des heures de leur scolarité en ne pratiquant pas la dictée ni l'épellation, mais, comme nous le verrons plus tard, ils ne souffrent pratiquement pas de dyslexie. Ne faudrait-il pas suivre de toute urgence l'exemple italien ? Brûler tous nos dictionnaires, passer outre nos académies et créer de toutes pièces une ortograf nouvel ke mém in enfan de trwa zan soré lir ?

Sans aller vers de tels extrêmes, il ne fait aucun doute pour moi que l'orthographe française devrait être simplifiée. Bon nombre des particularités orthographiques du français sont des reliques de temps révolus – l'accent circonflexe, par exemple, n'est qu'un vestige du vieux français où l'on prononçait *teste* plutôt que *tête*. Même si nous sommes tous attachés à la culture française, on ne voit guère en quoi la perte d'un accent circonflexe pourrait la mettre en péril. L'évolution des langues est un phénomène normal, qui se poursuit à l'oral alors même que nous l'avons malencontreusement interrompu à l'écrit. Depuis plusieurs siècles, le conservatisme de nos académies a figé le dictionnaire. L'évolution de l'orthographe a été entravée, alors que se poursuivait la transformation naturelle de la langue orale. L'importation de mots étrangers, les changements d'usage et de prononciation ont entraîné un vaste décalage entre l'écrit et l'oral qui entraîne des années de souffrances pour nos

enfants. La voix de la raison vote donc en faveur d'une simplification des règles orthographiques.

Cependant, avant de réformer, il importe de bien comprendre les origines des irrégularités de l'orthographe. Par-delà les vicissitudes de l'histoire linguistique, l'orthographe irrégulière du français s'explique également par la structure même de notre langue… et de notre cerveau. Les deux routes de lecture, la voie phonologique et la voie lexicale, imposent des contraintes souvent contradictoires à l'écriture d'une langue. De ce point de vue, le français, l'anglais, le chinois ou l'italien diffèrent suffisamment pour qu'il soit impossible d'adopter une solution unique et globale à l'écriture de toutes les langues. Nous ne pouvons pas simplement copier les Italiens – et toute réforme de l'orthographe devra manœuvrer avec prudence entre de nombreux écueils.

Tout d'abord, pourrions-nous, comme les Italiens, attribuer une lettre à chaque son et un son à chaque lettre ? Ce ne serait pas simple, car notre langue française comprend plus de phonèmes que l'italien. Nos voyelles, en particulier, sont très nombreuses : *a*, *e*, *i*, *o* et *u*, bien sûr, mais aussi un *o* et un *eu* durs (comparez *sot* et *sotte*, *bleu* et *beurre*), plusieurs sons *é*, *è* ou *ê*, et encore d'autres voyelles nasales *an*, *in*, *on*, *un*. Si l'on souhaitait dénoter chacun de ces sons par un signe particulier, il faudrait inventer de nouvelles lettres, bien au-delà des 26 signes de l'alphabet. Pour l'éviter, de nombreuses langues riches en phonèmes, telles que le français ou l'anglais, ont adopté un compromis qui consiste à noter certaines voyelles ou consonnes par des groupes de lettres telles que « an », « ch » ou « eu ». Ces graphèmes complexes, loin d'être des fioritures inutiles, jouent donc un rôle important dans l'économie de la lecture. S'il n'est pas inconcevable d'en remplacer certains par des caractères uniques (les nasales ã, õ, ĩ), il est certainement utopique d'appeler de nos vœux une écriture universelle dont les caractères transcriraient toutes les langues. Une telle écriture existe pourtant : c'est l'alphabet phonétique international, que les phonologues et les linguistes emploient pour transcrire dans une notation unique les sonorités de toutes les langues. Mais cet alphabet n'est d'aucune utilité dans la vie de tous les jours. Il comprend 170 signes, dont certains particulièrement étranges comme ɐ, ɓ, ɕ, ɮ ou ɲ. Même les spécialistes le jugent difficile à décrypter sans l'aide d'un dictionnaire. Une conclusion s'impose : dans la réflexion sur l'évolution de l'orthographe, la quête d'une

solution élégante et universelle doit céder le pas au pragmatisme. Nous aurons toujours besoin de graphies propres à chaque langue – qu'elles fassent appel à des caractères spéciaux comme « ã » ou à des combinaisons de caractères comme « an » ou « ch ».

Si l'on ne peut assurer qu'à une lettre corresponde un seul son, ne pourrait-on pas, au moins, transcrire systématiquement chaque son par la même lettre ou le même groupe de lettres ? Éviter, par exemple, de transcrire le même son *f*, tantôt par la lettre « f », tantôt par le « ph » ? Il ne fait aucun doute que l'on pourrait se débarrasser des nombreuses graphies redondantes qui parasitent notre langue et dont l'apprentissage encombre les premières années de l'enfant : les multiples notations du son *k* (tantôt « c », « k », « ck », « qu », voire « ch »…), l'équivalence entre « e », « eu » et « œu »… Adultes, nous avons perdu conscience de l'absurdité de notre orthographe. Même une lettre aussi simple que le « x » est superflue : elle représente deux phonèmes (*ks*). En Turquie, on prend un « taksi » – l'exemple de ce pays qui, en l'espace d'un an (1928-1929), a adopté l'alphabet latin, simplifié son orthographe, et appris à lire à trois millions de personnes, nous montre qu'il est possible de réformer avec succès.

Pourtant, là encore, la prudence s'impose, car une réforme radicale qui se contenterait d'assurer la transcription limpide et fidèle de la prononciation des mots serait probablement contre-productive en français. En effet, le rôle de l'écriture ne se borne pas à l'enregistrement des sons. Voltaire se trompait lorsqu'il affirmait, joliment mais erronément : « L'écriture est la peinture de la voix ; plus elle est ressemblante, meilleure elle est. » Un texte écrit n'est pas un disque de haute fidélité. Il ne vise pas à restituer la parole telle que nous la prononçons, mais plutôt à la coder à un niveau abstrait afin que nous puissions facilement en recouvrer les mots et le sens.

Imaginons un instant ce que pourrait être un système d'écriture purement phonétique, que Voltaire supposait optimal. En fonction du contexte, les mots ne s'écriraient pas de la même manière. En effet, lorsque nous parlons, nous modifions imperceptiblement la prononciation des mots selon les sons qui les entourent. L'orthographe devrait-elle refléter fidèlement ces phénomènes d'articulation croisée dont nous n'avons, bien souvent, aucune conscience ? Par exemple, devrions-nous écrire : « Un nan, trois zan, vingt tan » ? Transcririons-nous : « J'ai lavé ma rop sale », sous

prétexte que le mot « robe », lorsqu'il est suivi du son *s*, se prononce *rop* ? À l'extrême, devrions-nous tenir compte de l'accent du locuteur (« Poor lay zanglay »…) ? Il va de soi que non. L'objectif premier de l'écriture est de transmettre les mots et d'en restituer le sens. Il n'est donc pas possible d'adopter une transcription servile des sons en lettres. Bien souvent, la régularité de la transcription phonétique doit être sacrifiée au profit de la cohérence de la notation des mots. Par exemple, il n'est pas illogique d'écrire « petit » avec un « t » muet, dans la mesure où cette orthographe anticipe le féminin « petite ». Il est tentant de blâmer notre système orthographique qui ajoute des lettres muettes inutiles à la fin des mots. En réalité, la responsabilité de telles difficultés incombe à la structure de notre langue. Avant même d'apprendre à lire, chaque enfant français possède une représentation mentale du mot « petit » dans laquelle figure un son *t* muet, dont il n'est pas conscient, mais qui réapparaît dans les liaisons entre les mots (« un petit animal »). Dans ce domaine, l'orthographe n'est que l'esclave de la langue.

On s'aperçoit ainsi que l'orthographe française privilégie la transparence des racines, au détriment de la régularité des sons. Pourquoi écrivons-nous « femme » avec un « e », ce qui constitue une transcription très inhabituelle du son *a* ? Parce que cette orthographe fait directement apparaître la relation de sens avec d'autres mots de la même famille, comme « féminin » ou « femelle ». De même il n'est pas absurde de transcrire par la même lettre le *o* dur du mot « sot » et le *o* doux du mot « sotte », afin que leur racine commune reste apparente.

L'emphase sur le sens explique également pourquoi le français dispose d'autant de graphies distinctes pour les mêmes sons. En effet, l'homophonie est particulièrement fréquente en français, comme en témoignent les mots « seau », « sot », « sceau » et « saut ». Si l'on transcrivait tous ces mots phonétiquement, il deviendrait impossible de les distinguer à l'écrit. Les conventions orthographiques ont évolué pour tenir compte de cette contrainte qui complique certainement le travail de dictée, mais facilite immensément celui du lecteur. L'élève qui se lamente sur les dizaines d'orthographes du son « é » dans « tu es », « il est », « j'ai », « j'avais », « il avait », « vous avez », doit comprendre que ces fioritures sont indispensables à la lecture. Sans ces distinctions, le texte écrit ne serait qu'un rébus, que le lecteur passerait un temps considérable à décoder. Grâce

aux conventions orthographiques, l'écriture du français pointe plus directement vers le sens. Toute réforme de l'orthographe devra maintenir ce subtil équilibre entre la notation des sons et celle des sens qui reflète un phénomène profond et inamovible : l'existence de deux voies de lecture dans notre cerveau.

Le rêve impossible de la transparence orthographique

La tension entre lecture par le son et lecture par le sens est universelle. Tous les systèmes d'écriture doivent la résoudre par un compromis plus ou moins heureux, et qui dépend étroitement de la langue que l'on cherche à transcrire. Prenons l'exemple de l'italien. Pourquoi son orthographe est-elle aussi régulière et facile à apprendre ? Pourrions-nous imiter son exemple en français ? En fait, la langue italienne présente des particularités qui la rendent facile à transcrire par une écriture simple. Les mots italiens sont longs et comptent très souvent plusieurs syllabes. Leurs accords grammaticaux sont bien distingués par des voyelles sonores. Enfin, les homonymes y sont rares. C'est pourquoi une transcription purement régulière des sons ne pose pas de difficultés au lecteur. La langue italienne est parfaitement adaptée au choix d'une orthographe transparente : à chaque lettre correspond un son unique et indépendant du contexte, et à chaque chaîne de sons correspond un mot précis, dont le sens et l'inflexion grammaticale sont dépourvus d'ambiguïté.

En chinois mandarin, on assiste à un phénomène inverse de celui de l'italien. La plupart des mots chinois ne comportent qu'une ou deux syllabes, et comme il n'y a qu'environ 1 300 syllabes, chacune d'elles peut renvoyer à des dizaines de concepts très différents (figure 1.3). C'est pourquoi une écriture purement phonétique du chinois serait parfaitement inutilisable : chacun de ces rébus pourrait être compris de dizaines de manières différentes ! C'est pourquoi les milliers de caractères du mandarin transcrivent principalement les mots, ou plus exactement les morphèmes – les plus petits éléments de sens que contiennent les mots. Cependant, l'écriture chinoise emploie également des marqueurs phonétiques qui précisent la prononciation de cette racine et facilitent l'accès au mot précis auquel on souhaite se référer. Par exemple, le caractère 媽, qui signifie « mère » et se prononce *mā*, s'écrit avec le morphème 女 = « femme »

complété d’un marqueur phonétique 馬 = *mǎ*. Ainsi, contrairement aux idées reçues, même le chinois n’est pas une écriture purement idéographique – dont les éléments dénotent les concepts –, ni logographique – dont les signes réfèrent à des mots –, mais bien un système mixte « morpho-syllabique » où certains signes renvoient au sens des mots et d’autres à leur prononciation[30].

Bien entendu, il est plus difficile d’apprendre à lire le chinois que de déchiffrer l’italien. Il faut apprendre des milliers de signes dans le premier cas, alors qu’il suffit d’acquérir quelques dizaines de correspondances lettres-sons dans le second. L’italien et le mandarin occupent ainsi les extrêmes d’une échelle de « transparence orthographique », où le français et l’anglais se situent dans une position intermédiaire[31]. En français parlé, comme en anglais, les mots sont assez courts et les homonymes fréquents (« right », « write », « rite » ; « mais », « mes », « mets »). Pour faire face à ces contraintes, l’orthographe du français et de l’anglais incorpore un mélange de transcription phonétique et lexicale. Ce phénomène est source de difficultés orthographiques pour le scripteur mais, une fois passées les difficiles années d’apprentissage, il simplifie la tâche du lecteur.

石室詩士食獅史

石室詩士施氏，嗜獅，誓食十獅。氏時時適市視獅十時，適十獅適市，是時，適施氏適市。氏視是十獅，恃失勢，使是十獅逝世。氏拾是十獅屍，市石室。石室濕，氏使侍拭石室。石室試，氏始試食是十獅屍。食時始識是十獅屍實十石獅屍。試釋是事。

Histoire d’un poète consommant des lions dans une salle de pierre

Un poète nommé Shi habitait dans une salle de pierre, et il avait la manie des lions. Il avait juré d’arriver à en consommer au moins dix. Alors, de temps en temps, il se rendait au marché aux lions vers dix heures. Par hasard, il y en avait dix sur le marché un jour où Shi y était. Apercevant ces dix lions, Shi les mit à mort par peur de les perdre. Puis, il ramassa leurs cadavres et les stocka dans sa salle de pierre. Comme la salle était humide, Shi la fit nettoyer par un serviteur. Ensuite, Shi commença à essayer de goûter ces dix cadavres de lion et, en les consommant, il sut finalement que ce qu’il avait pris était vraiment les dix cadavres de lion. Essayez de l’expliquer !

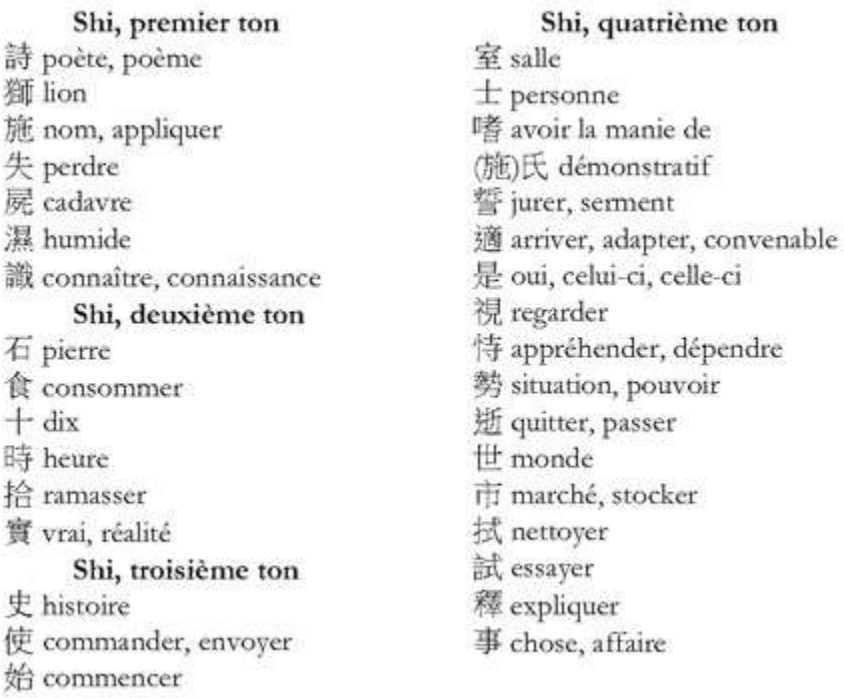


Figure 1.3. En dépit des apparences, l'orthographe obéit à une certaine logique. Le plus irrégulier des systèmes semble être l'écriture chinoise, qui utilise jusqu'à vingt ou trente caractères pour le même son. Pourtant, cette redondance n'est pas inutile, car le chinois comprend de nombreux mots homophones. Dans cet exemple extrême, tous les mots se prononcent *Shi* ! Bien que ce texte soit dépourvu de toute qualité littéraire, n'importe quel lecteur du chinois peut le comprendre, ce qui ne serait pas le cas s'il était transcrit phonétiquement. L'orthographe du chinois désambiguïse les sons en les écrivant à l'aide de caractères distincts selon le sens des mots. C'est pour la même raison que l'orthographe française conserve beaucoup de graphies différentes pour les mêmes sons (si six scies scient…). Il y a une certaine logique à ce que l'orthographe du français ne soit pas transparente.

En bref, nous commençons seulement à comprendre les contraintes croisées qui façonnent l'orthographe. Ne serait-il pas téméraire d'en envisager la réforme ? Je crois pourtant qu'une forte simplification s'impose. Nous la devons à nos enfants qui perdent des centaines d'heures à ce jeu cruel, et dont certains ne sortiront pas indemnes, stigmatisés à vie par leur dyslexie ou simplement parce qu'ils sont issus de familles défavorisées ou multilingues, qui sont les premières victimes de notre orthographe archaïque. J'espère que la prochaine génération, coutumière du langage abrégé de l'Internet et des téléphones portables, cessera de considérer cette question comme un tabou et saura trouver la volonté d'aborder cette question d'une manière rationnelle. Mais la question ne se réduira pas à l'adoption d'une solution simple, celle du « tout phonétique ». Le français, avec ses nombreuses homophonies, ne pourra jamais s'écrire aussi simplement que l'italien. Le rêve d'une langue strictement régulière n'est

sans doute qu'un leurre, comme le suggère, avec humour, ce petit pamphlet qui circule dans la Communauté européenne depuis quelques années :

> The European Union commissioners have announced that agreement has been reached to adopt English as the preferred language for European communications, rather than German, which was the other possibility. As part of the negotiations, the British government conceded that English spelling had some room for improvement and has accepted a five-year phased plan for what will be known as EuroEnglish (Euro for short).
> In the first year, "s" will be used instead of the soft "c". Sertainly, sivil servants will resieve this news with joy. Also, the hard "c" will be replaced with "k". Not only will this klear up konfusion, but typewriters kan have one less letter. There will be growing publik enthusiasm in the sekond year, when the troublesome "ph" will be replaced by "f". This will make words like "fotograf" 20 per sent shorter.
> In the third year, publik akseptanse of the new spelling kan be expekted to reach the stage where more komplikated changes are possible. Governments will enkorage the removal of double letters, which have always ben a deterent to akurate speling. Also, al wil agre that the horible mes of silent "e"s in the languag is disgrasful, and they would go.
> By the fourth year, peopl wil be reseptiv to steps such as replasing "th" by "z" and "w" by "v". During ze fifz year, ze unesesary "o" kan be dropd from vords kontaining "ou", and similar changes vud of kors be aplid to ozer kombinations of leters.
> After zis fifz yer, ve vil hav a reli sensibl riten styl. Zer vil be no mor trubls or difikultis and evrivun vil find it ezi tu understand ech ozer.
> Ze drem vil finali kum tru !

Les deux voies de la lecture

Résumons-nous : tous les systèmes d'écriture oscillent entre l'écriture des sens et celle des sons. Cette distinction se reflète directement dans le cerveau du lecteur. La plupart des modèles de la lecture postulent que deux voies de traitement de l'information coexistent et se complètent. Lorsque nous lisons des mots rares, nouveaux, à l'orthographe régulière, voire des néologismes inventés de toutes pièces, notre lecture passe par une voie phonologique qui décrypte les lettres, en déduit une prononciation possible, puis tente d'accéder au sens. Inversement, lorsque nous sommes confrontés à des mots fréquents ou irréguliers, notre lecture emprunte une voie directe, qui récupère d'abord le mot et son sens, puis utilise ces informations pour en recouvrer la prononciation (figure 1.4).

La meilleure preuve de l'existence de ces deux voies nous vient de la neuropsychologie – l'étude des conséquences des lésions cérébrales.

Certains patients, à la suite d'un accident vasculaire, perdent la capacité de convertir les lettres en sons[32]. Ces personnes, qui ont appris à lire normalement, développent à la suite d'une lésion cérébrale ce que l'on appelle une « dyslexie profonde » ou une « dyslexie phonologique ». Comme leur voie de conversion des lettres en sons est sévèrement détériorée, elles ne parviennent plus à prononcer les mots rares mais réguliers comme « sextant », et surtout les néologismes et les mots inventés comme « départition » ou « calouture ». Cependant, elles conservent une bonne compréhension des mots les plus fréquents et parviennent généralement à prononcer même les plus irréguliers d'entre eux, comme « femme » ou « monsieur ». Parfois, elles opèrent des glissements de sens et lisent par exemple « viande » au lieu de « jambon », ou « artiste » au lieu de « peintre ». La nature même de ces erreurs montre bien que l'accès au sens demeure préservé, alors même que l'accès aux sons fait défaut : comment le patient pourrait-il s'approcher du sens correct s'il n'avait pas, au moins en partie, compris le sens du mot qu'il cherche à lire ? Chez ces patients, les mots peuvent être reconnus, au moins partiellement, alors que leur prononciation est devenue inaccessible.

On peut également observer la pathologie inverse : certains patients, qui souffrent d'un autre syndrome appelé « dyslexie de surface », n'accèdent plus aux mots par la voie directe. Ils doivent prononcer les mots pour les comprendre. Les limites de la « voix muette » se révèlent alors clairement. De tels patients, en effet, parviennent encore à lire les mots réguliers comme « dorade », et même les néologismes comme « chicopar », mais pas les mots irréguliers. Ils lisent ces derniers en les régularisant, comme s'ils se prononçaient normalement. Tel patient, par exemple, lira « femme » comme *fèm*, puis assurera en toute bonne foi qu'il ne connaît pas ce mot.

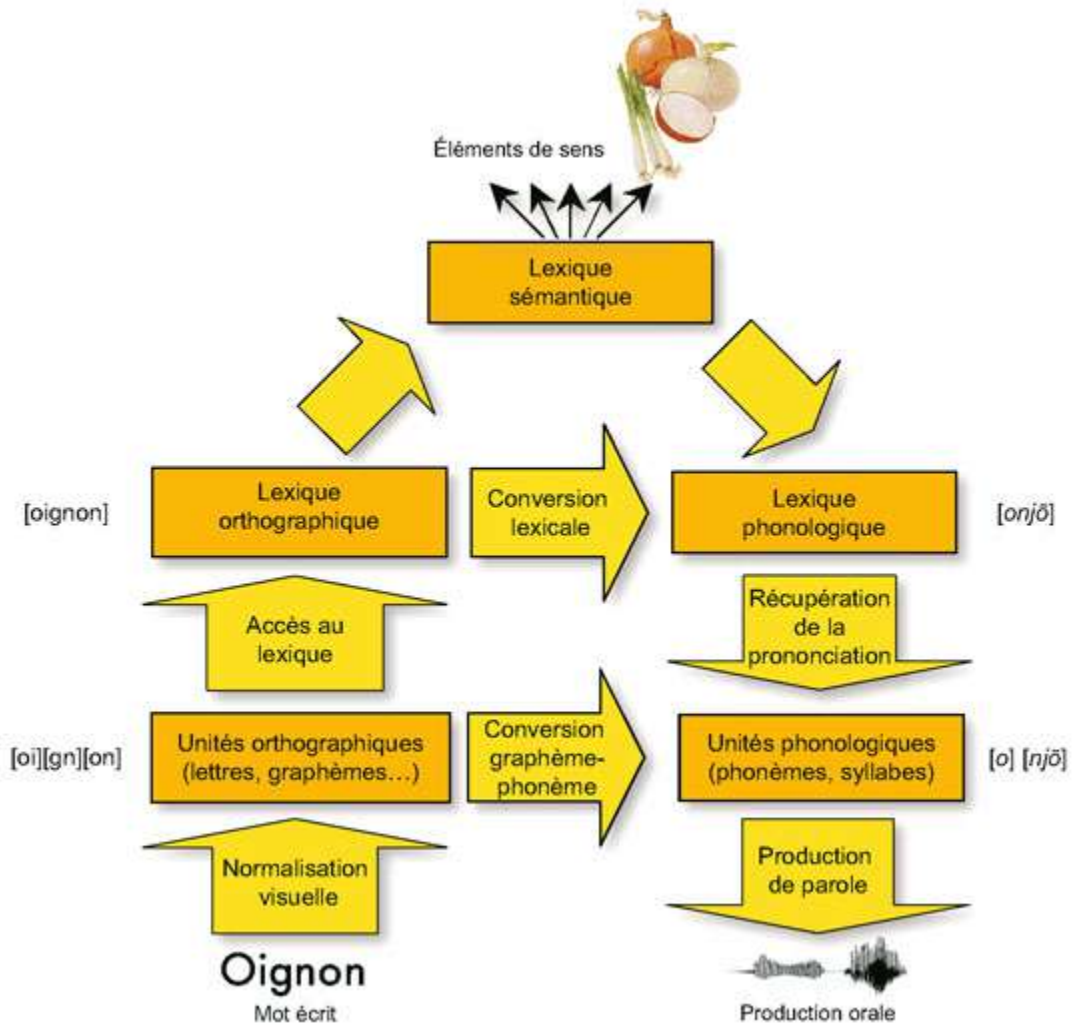


Figure 1.4. La lecture d'un mot emprunte de multiples voies parallèles de traitement de l'information. Pour passer du mot écrit (en bas à gauche) à sa prononciation (en bas à droite), notre cerveau dispose de plusieurs routes, grossièrement schématisées ici sous forme d'une hiérarchie de boîtes et de flèches. Lorsque le mot est régulier, une voie phonologique convertit les graphèmes en phonèmes. Lorsque le mot est irrégulier, comme « oignon », des représentations plus profondes sont impliquées. On peut les comparer à des lexiques mentaux qui associent la forme et le sens.

L'étude comparée de ces deux types de patients confirme qu'il existe bien deux voies de lecture. Mais elle prouve surtout qu'aucune de ces deux voies, à elle seule, ne suffit à lire tous les mots. La voie directe, qui passe des lettres aux mots et à leur sens, permet de lire la plupart des mots suffisamment fréquents, mais elle achoppe sur les mots nouveaux, qui ne font pas partie du lexique mental. Inversement, la voie indirecte, qui passe d'abord des lettres aux sons et, de là, à leur sens, joue un rôle crucial dans l'apprentissage des mots nouveaux, mais elle est inefficace pour les mots irréguliers comme « femme » et les homonymes comme « sot ». Lorsque

nous lisons à haute voix, les deux routes conspirent et collaborent l'une avec l'autre. Chacune d'elles apporte sa contribution à la prononciation des mots. La plupart des sons se déduisent de la suite des lettres, grâce à la voie de conversion des graphèmes en phonèmes, tandis que les ambiguïtés sont résolues par un petit coup de pouce des niveaux supérieurs, le lexique des mots et leur sens. Selon le mot à lire – connu ou non, fréquent ou rare, régulier ou irrégulier – et selon la tâche souhaitée – lecture à haute voix ou compréhension du texte –, la contribution respective des deux voies est prépondérante ou mineure.

Chez l'enfant, la coordination de ces deux routes n'est pas toujours effective. Certains enfants utilisent surtout la voie directe et font une lecture-devinette, en lisant un mot synonyme de celui désiré (« sac » au lieu de « cartable », par exemple). D'autres ânonnent une prononciation bricolée à partir des lettres, mais restent bloqués au niveau des sons sans toujours en comprendre le sens. C'est seulement après plusieurs années d'apprentissage que les deux voies finissent par s'intégrer l'une à l'autre, au point de produire, chez le lecteur adulte, l'apparence d'un système de lecture unique et intégré.

La plupart des modèles psychologiques contemporains s'accordent ainsi à penser que la lecture experte et fluide résulte d'une coordination étroite de deux voies de lecture. Dans les années 1980 et 1990, on a pourtant vu fleurir des tentatives de modélisation de ces résultats par une voie unique. À l'époque, les modèles de réseaux de neurones suscitaient un engouement considérable. Certains chercheurs croyaient déjà avoir trouvé leur graal : une machine universelle d'apprentissage, dépourvue de toute architecture initiale, qui découvrirait toute seule les régularités de la lecture sans qu'il soit besoin de l'organiser en voies multiples. Ainsi imaginait-on qu'il suffirait de connecter des entrées visuelles représentant les lettres, avec des sorties auditives représentant les sons et de laisser tourner un puissant algorithme d'apprentissage. On obtiendrait un réseau à une seule voie qui parviendrait à simuler non seulement la lecture normale, mais aussi ses pathologies sans qu'il soit nécessaire de postuler des voies multiples de la lecture.

Bien que ces réseaux de neurones aient représenté, à leur époque, des avancées remarquables, notamment dans la modélisation du passage des graphèmes aux phonèmes[33], la plupart des chercheurs estiment aujourd'hui

que cette approche ne suffit pas. On ne peut se passer d'une analyse de l'architecture des processus cérébraux, et celle-ci est organisée selon des voies parallèles et partiellement redondantes. Pratiquement tous les modèles récents, même ceux qui reposent sur des réseaux de neurones, incorporent aujourd'hui l'idée essentielle des voies multiples de la lecture[34]. De fait, lorsque nous aborderons les bases cérébrales de la lecture, nous verrons que l'organisation en voies multiples et parallèles est un trait essentiel de l'architecture du cortex. Ainsi, les modèles à deux voies sous-estiment vraisemblablement la complexité et la divergence des voies neuronales de la lecture. Toutefois, la séparation fondamentale entre une voie de conversion graphèmes-phonèmes, et une voie d'accès au sens demeure, en première approximation, une distinction essentielle.

Des encyclopédies plein la tête

Tant que nous considérions la voie phonologique qui convertit les graphèmes en phonèmes, nous pouvions imaginer que la lecture passait par l'application d'un petit nombre de règles simples. Après tout, notre alphabet ne comprend que 26 lettres, et le nombre de graphèmes ne dépasse pas 150. Toutefois, si l'on considère maintenant la voie lexicale, celle qui reconnaît les mots familiers, il nous faut imaginer un stockage massif de dizaines de milliers de mots dans une sorte de dictionnaire que les psychologues appellent le « lexique mental ». Sans doute faudrait-il parler de lexiques au pluriel. En effet, les informations qui y sont enregistrées sont de plusieurs natures.

On peut tout d'abord isoler le lexique orthographique, qui stocke l'image écrite des mots, ou plutôt leur structure orthographique abstraite. Il s'agit de l'arbre hiérarchique des graphèmes que j'ai décrit plus haut. Le mot « oignon », par exemple, y serait codé par une hiérarchie de graphèmes [oi][gn][on]. Vient ensuite le lexique phonologique, où est enregistrée la prononciation des mots – le fait que « oignon » se prononce *onion*, par exemple. N'oublions pas l'information grammaticale, qui spécifie que « oignon » est un nom, qu'il est masculin, qu'il a un pluriel régulier, et ainsi de suite. Enfin, chaque mot est associé à des dizaines d'informations sémantiques qui en précisent le sens : un oignon est un légume, de taille moyenne, de couleur jaune ou blanche, qui fait pleurer, etc.

Pour rendre compte du fonctionnement de la voie lexicale, l'image la plus appropriée est donc celle d'une collection de dictionnaires, dont les pages s'ouvrent successivement à mesure que nous accédons à l'information. Notre cerveau héberge une bibliothèque en plusieurs volumes, depuis le guide de l'orthographe jusqu'au manuel de prononciation et au grand dictionnaire encyclopédique.

Combien d'entrées ces dictionnaires mentaux comprennent-ils ? La plupart des gens sous-estiment l'étendue de nos connaissances lexicales de façon grossière. Certains colportent sans réfléchir l'idée reçue que Racine ou Corneille ne s'exprimaient qu'avec quelques milliers de mots. On entend dire que le *Basic English*, une version simplifiée de l'anglais qui ne comprend que 850 mots, permet de tout dire avec efficacité, et certains affirment que le lexique de certains jeunes se borne à 500 mots !

Toutes ces idées sont fausses. On dispose d'excellentes estimations de la taille du vocabulaire d'une personne ordinaire, et elles se chiffrent aisément en dizaines de milliers de mots. Un dictionnaire compte fréquemment 100 000 entrées. Parmi celles-ci, une évaluation statistique permet d'estimer qu'un individu moyen connaît environ 40 000 ou 50 000 mots – sans même tenir compte des mots composés. À cela vient s'ajouter une quantité au moins aussi considérable de noms propres, d'acronymes (CGT, SNCF), de sigles (Auchan, Coca-Cola), de noms étrangers, etc. Au total, chacun des lexiques de notre cerveau comprend sans doute entre 50 000 et 100 000 entrées. On mesure mieux l'extraordinaire performance de notre appareil de lecture, qui est capable d'accéder, en quelques dixièmes de seconde, sur la base de quelques traits sur la rétine, au mot approprié parmi au moins 50 000 candidats.

Une assemblée de démons

Plusieurs modèles de l'accès au lexique mental parviennent aujourd'hui à reproduire les performances de la lecture humaine, dans des conditions proches des contraintes imposées par notre système nerveux. Pratiquement tous reposent, de près ou de loin, sur les idées fondatrices d'Oliver Selfridge qui, pour rendre compte des opérations mises en œuvre dans la reconnaissance des lettres, avait proposé dès 1959 la métaphore d'une assemblée de démons ou « *pandemonium*[35] ».

Dans cette comparaison haute en couleurs, il nous faut imaginer un immense hémicycle – c'est le lexique mental – où sont rassemblés des dizaines de milliers de démons en compétition. Chaque démon est le représentant d'un mot. Il entend bien le faire savoir en criant vigoureusement lorsqu'il pense que son mot doit être défendu. Lorsqu'un mot apparaît sur la rétine, tous les démons l'examinent simultanément. Ensuite, ils se manifestent s'ils estiment que leur mot a de bonnes chances d'être présent. Ainsi lorsque survient le mot « caramel », le démon qui représente ce mot se met à hurler. Cependant son voisin, qui a cru voir « carmel », s'agite également. Caramel ou carmel ? Après une brève période de compétition, le défenseur de « carmel » doit s'incliner – il est clair que son adversaire trouve dans le stimulus « caramel » plus d'arguments en sa faveur. Le mot est enfin reconnu, et son identité peut être transmise par le démon vainqueur au reste du cerveau.

Sous la simplicité apparente de cette métaphore, on discerne plusieurs idées centrales sur le fonctionnement du système nerveux au cours de la lecture :

• **Traitement en parallèle :** tous les démons travaillent en même temps. Il n'est pas nécessaire d'examiner chacun des 50 000 mots un par un. Il en résulte un extraordinaire gain de temps par rapport à un modèle sériel qui prendrait un temps d'autant plus long que le dictionnaire mental est épais.

• **Simplicité de fonctionnement :** chaque démon accomplit un travail élémentaire. Il se contente d'examiner dans quelle mesure le mot qui lui est assigné correspond aux lettres présentées en entrée. Même si j'ai présenté métaphoriquement les démons comme des êtres de chair, doués d'intentions, leur activité n'est que pure mécanique. Le modèle du *pandemonium* ne succombe donc pas au paradoxe de l'*homunculus*, ce petit homme qui, dans la psychologie naïve, est censé tenir les rênes de notre cerveau (mais qui donc contrôle le sien ? un autre *homunculus* plus petit ?). Le modèle du *pandemonium* suit le précepte du philosophe Daniel Dennett : « On élimine l'homunculus en organisant des armées d'idiots pour faire le travail[36]. »

• **Compétition et robustesse :** les démons se disputent le droit de représenter le mot correct. Cette compétition confère au modèle robustesse et flexibilité. Le *pandemonium* s'adapte automatiquement à la difficulté du problème en cours. S'il n'y a pas d'autres compétiteurs plausibles, même un

mot rare et mal orthographié comme « astrqlabe » pourra être reconnu correctement en un temps très court. En effet, le démon qui le représente, même s'il crie moins fort, gagnera toujours nettement sur les autres. Par contre, si le mot est « lien », de nombreux démons (tien, mien, bien, sien, lion, lier…) vont s'activer et il faudra au démon « lien » de sérieux arguments pour s'imposer.

Or, et c'est là tout l'intérêt de la métaphore proposée par Selfridge, ces propriétés du modèle du *pandemonium* correspondent aux caractéristiques de notre système nerveux. Composé de près de cent mille millions de neurones (10^{11}), celui-ci est l'archétype d'un système massivement parallèle, dans lequel de multiples éléments effectuent en parallèle des opérations simples et forment des coalitions qui entrent en compétition les unes avec les autres par l'intermédiaire de synapses excitatrices et inhibitrices.

C'est ainsi que le *pandemonium* de Selfridge a inspiré de nombreux modèles théoriques des réseaux de neurones impliqués dans la lecture. La figure 1.5 présente l'un des tout premiers. Il a été proposé par Jay McClelland et David Rumelhart en 1981[37]. On y voit des unités organisées en trois niveaux hiérarchiques :

— tout en bas, en entrée, les neurones sensibles aux traits présents sur la rétine ;

— au milieu, les détecteurs de lettres ;

— enfin en haut, les unités qui codent pour des mots.

Un fourmillement de connexions relie ces éléments. Cette énorme connectivité transforme la dynamique du réseau en un complexe jeu politique où les lettres et les mots se soutiennent, se censurent ou s'éliminent mutuellement. Les faisceaux de connexions définissent des sous-ensembles d'unités qui s'épaulent l'une l'autre ou, au contraire, entrent en compétition. Examinons leur organisation de plus près. Sur le diagramme de la figure 1.5, on distingue des connexions excitatrices, symbolisées par de petites flèches, et d'autres inhibitrices, représentées par de petits ronds. Ce sont ces connexions qui propagent les « votes » de chacun des démons. Chaque détecteur de trait, par exemple, envoie de l'excitation vers les lettres qui le contiennent – on pourrait dire que chaque neurone visuel « vote » pour la présence d'une lettre ou de plusieurs lettres.

De même les détecteurs de lettres conspirent pour soutenir tel ou tel mot – la présence d'un A et d'un N soutient fortement « BAIN » et « TANK », un peu « BAIL », pas du tout « VIDE ».

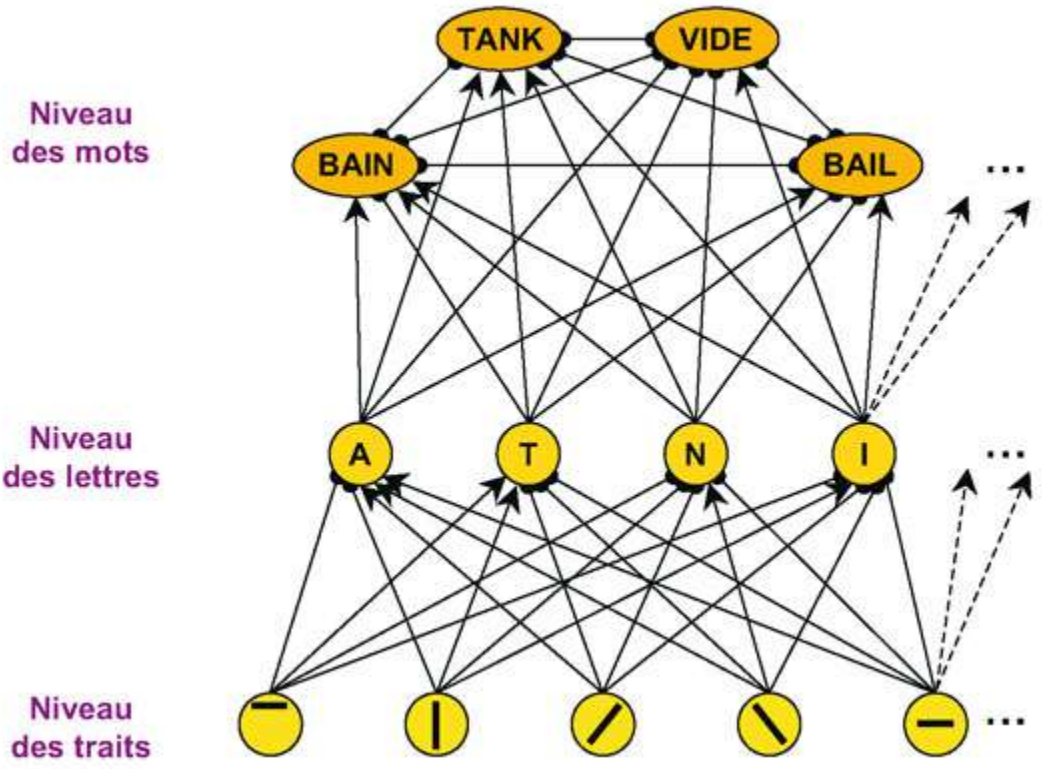


Figure 1.5 Notre système cérébral de lecture ressemble à une vaste assemblée dans laquelle des milliers de mots et de lettres conspirent afin de proposer la meilleure interprétation possible du mot perçu. Selon le modèle de McClelland et Rumelhart (1981), dont on voit ici un fragment, les traits élémentaires de la chaîne de caractères présentée en entrée activent des détecteurs de lettres, qui eux-mêmes activent préférentiellement les mots qui les contiennent. Les liaisons sont excitatrices (flèches), mais aussi inhibitrices (traits terminés par des ronds noirs). De la compétition entre unités lexicales émerge un mot dominant, qui représente la meilleure hypothèse que nous puissions émettre sur le stimulus présenté.

Les connexions inhibitrices jouent un rôle primordial dans la sélection du meilleur candidat. En effet, l'inhibition véhicule ce que l'on pourrait appeler un « vote de censure ». D'une part, les lettres votent contre les mots qui ne les contiennent pas. D'autre part, les mots en compétition s'inhibent mutuellement : l'identification du mot « BAIN » n'est pas compatible avec la présence du mot « BAIL », et *vice versa*.

Il existe enfin des connexions descendantes, depuis les mots vers les lettres : comme à l'Assemblée nationale, les lettres se font représenter par des mots qui, en retour, soutiennent les lettres qui votent pour elles… Un tel système permet la formation de coalitions stables, capables de résister à l'absence occasionnelle de quelques unités : si une lettre « o » manque à

l’appel, dans « crocqdile » par exemple, ses voisines conspireront tout de même pour élire le mot « crocodile », et ce dernier votera, en retour, en faveur de la lettre « o » même si elle n’est pas physiquement présente. Au total, des millions de connexions incorporent les nombreuses contraintes qui relient les niveaux des mots, des lettres et des traits.

D’autres subtilités sont également utiles à un fonctionnement harmonieux de l’ensemble. Par exemple, toutes les unités-mots ne se déclenchent pas forcément au même seuil : certaines ont besoin de plus de votes que d’autres. À soutien égal, un mot que l’on rencontre fréquemment aura plus de chances de gagner la compétition qu’un mot rare.

À cause de toutes ces fioritures, il n’est pas toujours aisé de deviner, lorsque l’on présente une série de lettres en entrée, quel va être le comportement du système. La dynamique du réseau est si complexe qu’on ne sait pas complètement l’analyser sur le plan mathématique. Une simulation par ordinateur est donc indispensable. Elle seule permet de mesurer en combien de temps, et avec quel taux d’erreurs, le système converge vers le mot approprié.

La lecture parallèle

Pourquoi les psychologues s’embarrassent-ils de modèles aussi complexes de la lecture ? Ils ont une bonne raison pour cela : ces modèles produisent des prédictions qui s’accordent remarquablement aux résultats de la psychologie expérimentale. Non seulement les modèles inspirés du *pandemonium* parviennent à reproduire les résultats d’expériences classiques, mais, de plus en plus souvent, ils mènent à la découverte de phénomènes nouveaux, parfois très subtils.

Imaginons que vous deviez programmer, sur votre ordinateur personnel, un logiciel de reconnaissance des mots. Quelle que soit la façon dont vous vous y preniez, il est presque certain que plus le mot sera long, plus votre programme mettra de temps à répondre. Il serait naturel, par exemple, que vous décidiez de traiter les lettres l’une après l’autre, de la gauche vers la droite. Puisque le microprocesseur traite les instructions une à une, on s’attend à ce qu’un mot de six lettres prenne deux fois plus de temps qu’un mot de trois lettres.

Or il n’en va pas ainsi pour notre cerveau. Chez l’adulte bien entraîné, le temps de lecture des mots ne dépend pas de leur longueur. Tant que les mots comprennent six lettres ou moins, leur reconnaissance prend un temps constant indépendant du nombre de lettres qui les composent[38]. De toute évidence, nous disposons d’un mécanisme parallèle d’appréhension des lettres. Ce résultat n’est pas compatible avec la métaphore d’un ordinateur sériel, qui scannerait les caractères un par un. Par contre, il se conforme précisément aux prédictions du *pandemonium*, dans lequel des milliers de processeurs ultraspécialisés travaillent en parallèle à tous les niveaux – traits, lettres et mots.

Le décodage actif des lettres

Poursuivons la métaphore informatique. Dans un programme classique, le traitement de l’information se fait naturellement étape par étape, du plus simple au plus complexe. Il faut d’abord reconnaître les lettres avant de les assembler en graphèmes, puis en mots. Il y a fort à parier, dès lors, qu’un fiasco à la toute première étape se traduirait par un échec complet de la reconnaissance. Confondre d’emblée une lettre avec une autre serait catastrophique pour la suite des opérations. De fait, les meilleurs logiciels de reconnaissance de texte restent fragiles et très sensibles à la moindre dégradation de la page qu’on leur donne à lire – quelques poussières sur la photocopie, et une page qui nous paraît lisible devient un galimatias pour l’ordinateur.

Qu’en est-il de notre cerveau ? Pour le savoir, lisez rapidement la phrase suivante :

Cet oiseau vert a un joli bec

À votre insu, votre cerveau vient de résoudre sans effort toute une série de difficultés qui auraient confondu un ordinateur. Avez-vous seulement remarqué que, dans le mot « oiseau », les lettres « *o* » et « *a* » ont exactement la même forme ? Avez-vous pris conscience que la voyelle « *u* » qui débute le mot « un » est en fait une consonne « *v* », strictement identique à celle du mot « vert » ? Et avez-vous perçu que les deux dernières lettres du mot « bec » sont les mêmes ? L’ambiguïté est résolue

par le contexte : « bcc » ne serait pas une suite de lettres correcte en français, alors que l'interprétation « bec » convient à la fois du point de vue de la prononciation et du sens. En bref, des ambiguïtés qui feraient trébucher les meilleurs logiciels n'arrêtent pas la lecture humaine : les conspirations des lettres, des mots et du contexte de la phrase confèrent à notre appareil de lecture une extraordinaire robustesse.

C'est donc bien le cerveau qui impose une organisation à la page écrite. Comme le disait si justement Alberto Manguel, c'est l'œil avisé du lecteur qui donne vie au texte – ou plutôt son cerveau ! Sans l'action de notre lexique mental, le mot écrit resterait « lettre morte ». L'identification des lettres et des mots est un processus actif de décodage dans lequel le cerveau ajoute de l'information au signal visuel.

Les psychologues ont découvert une manifestation remarquable de ce décodage actif : l'effet de supériorité des mots. Dans l'expérience classique élaborée par Reicher[39], on demande à un lecteur adulte laquelle de deux lettres (par exemple S ou T) a été brièvement présentée sur un écran. Dans certains essais, la lettre est présentée seule. Le niveau de difficulté est ajusté en masquant la lettre par une autre image (typiquement une série de caractères ####) afin que la personne ne parvienne que rarement à choisir la lettre correcte. Dans d'autres essais, on présente la même lettre S ou T dans le contexte d'un mot (par exemple MORS ou MORT). Notez bien que les lettres qui ont été ajoutées, MOR, n'apportent aucune information qui permette d'identifier la lettre critique, puisqu'elles sont identiques dans les deux cas. Pourtant, en présence de ces lettres redondantes, les performances sont bien meilleures ! On observe une augmentation considérable, de l'ordre de 10 %, de la capacité à identifier une lettre dans le contexte d'un mot. Ce phénomène persiste lorsque la lettre est insérée dans un néologisme (GORT) ou dans une chaîne de consonnes qui ressemble suffisamment à un mot (SPRT), mais pas dans une série aléatoire de lettres (QHMT)[40].

À nouveau, il serait difficile d'expliquer ce phénomène perceptif dans un modèle informatique linéaire, où l'identification des lettres précéderait strictement leur combinaison en unités plus grandes. Au contraire, l'effet de supériorité des mots découvert par Reicher souligne à nouveau la redondance et le parallélisme de notre reconnaissance visuelle des mots. Nous ne pouvons pas reconnaître une lettre seule sans bénéficier immédiatement du contexte dans lequel elle est présentée. Ce contexte, s'il

forme un mot ou un fragment de mot, donne accès à des niveaux supplémentaires de codage (graphèmes, syllabes, morphèmes), dont les « votes » s'ajoutent à ceux des lettres et en facilitent la perception. La plupart des modèles de la lecture expliquent l'effet de Reicher en supposant que les interactions entre lettres et mots fonctionnent dans les deux sens : les unités de niveau supérieur conspirent pour favoriser la détection des lettres qui sont compatibles avec leur propre interprétation. Ainsi, ce que nous voyons dépend de ce que nous croyons voir.

Conspirations et compétitions au sein du lexique

La métaphore informatique qui ferait du lecteur humain un simple « scanner » s'avère manifestement inadéquate. Le décodage des mots ne procède pas de façon strictement séquentielle, et le temps que nous mettons à lire un mot n'est pas bien prédit par le nombre de lettres qu'il contient. Revenons plutôt au modèle de l'assemblée de démons. Combien de temps faut-il à une assemblée humaine pour s'accorder sur une motion importante ? On devine que ce « temps de convergence » ne dépend pas tant du contenu de la motion elle-même que des débats qu'elle suscite. Si tous les députés sont d'accord, même un texte compliqué peut être adopté dans un délai très court. À l'inverse, tel aspect ponctuel de la législation, s'il touche un point sensible, peut déclencher une longue polémique avant qu'un accord soit trouvé.

Il en va exactement de même dans le cerveau du lecteur. La reconnaissance d'un mot demande que de multiples systèmes cérébraux s'accordent sur une interprétation univoque de l'entrée visuelle. Le temps que nous mettons à lire un mot dépend donc moins de ses propriétés intrinsèques que des conflits ou des coalitions qu'il induit au sein de notre architecture cérébrale.

Au fil des années, la psychologie expérimentale a révélé que ces conflits pouvaient trouver leur origine à tous les niveaux du traitement. Au sein du lexique, par exemple, les mots entrent en compétition entre « voisins ». Ainsi nomme-t-on des mots très proches, qui partagent toutes leurs lettres sauf une[41]. Le mot « loir », par exemple, a pour voisins les mots « soir », « noir », et « loin », alors que le mot « drap » est un ermite dépourvu de voisins. Il s'avère que le nombre et surtout la fréquence

relative des voisins jouent un rôle crucial dans le temps de reconnaissance d'un mot[42].

Parfois, avoir de nombreux voisins peut être une bonne chose. Par exemple, à fréquence égale, plus un mot possède de voisins et moins nous mettons de temps à dire qu'il appartient au lexique du français. La présence des voisins rend le mot « loir » plus typique du français que le mot « drap ». Les voisinages fortement habités fournissent également des conditions privilégiées pour l'apprentissage : nous avons de nombreuses occasions d'apprendre la prononciation des petits mots qui se terminent en « oir », mais peu d'expérience de la terminaison « ap », qui est sans doute moins bien codée aux niveaux visuel et phonologique.

Cependant, les voisins peuvent également se révéler envahissants. Comprendre ou nommer un mot demande souvent de l'identifier de façon unique, et donc de le séparer nettement de ses voisins – ce qui peut être particulièrement difficile si ceux-ci apparaissent avec une beaucoup plus grande fréquence dans la langue[43]. Ainsi le mot « loir » sera-t-il reconnu avec lenteur, car il entre en compétition avec des mots très fréquents tels que « noir » et « soir ». De même, « aveu », qui est un mot rare, souffre-t-il de la proximité d'un envahissant voisin, le mot très fréquent « avec ». Notre lexique est une arène où la compétition est rude et où l'avantage va aux « habitués », c'est-à-dire aux mots les plus fréquents.

La compétition intervient également au sein de la voie de conversion des graphèmes en phonèmes. Pourquoi le mot « oiseau » prend-il plus de temps à lire à haute voix que le mot « canari » ? Dans « oiseau », les unités de lecture sont des graphèmes complexes « oi », « s », et « eau », dont la prononciation s'écarte radicalement de celle des lettres isolées « o », « i », « s », « e », « a » et « u ». Dans « canari », au contraire, toutes les lettres se prononcent d'une manière simple et directe. La psychologie expérimentale met en évidence ce conflit latent entre le niveau des lettres et celui des graphèmes – il existe, au cours de la lecture des graphèmes complexes, une brève période de compétition inconsciente, dont l'issue est trouvée en quelques dizaines de millisecondes, mais qui conduit néanmoins à un ralentissement mesurable par rapport à un mot simple tel que « canari »[44].

Il est remarquable que la plupart de ces conflits se résolvent automatiquement, sans que nous ayons besoin d'intervenir activement. Lorsque notre système nerveux rencontre une ambiguïté, sa règle

fondamentale est de laisser toutes les possibilités ouvertes – ce qui n'est possible que dans un système massivement parallèle, où plusieurs interprétations peuvent être considérées simultanément. Ainsi les niveaux de traitement suivants peuvent-ils apporter leurs propres éléments d'interprétation, jusqu'à ce qu'une solution globalement satisfaisante soit trouvée. Dans certains cas, seul le contexte de la phrase permet de décider du sens d'un mot, ou même de sa prononciation, par exemple dans les fameuses phrases « les poules du couvent couvent », ou « mon petit-fils a cassé les fils de son cerf-volant ». L'expérience suggère que, dans de tels cas, toutes les interprétations possibles du mot sont inconsciemment activées en parallèle, avant que le contexte ne vienne sélectionner l'un des sens possibles[45]. Nos processus de lecture sont si efficaces qu'il est bien rare que nous prenions conscience de ces ambiguïtés, comme dans l'exemple suivant :

« Docteur, ma femme est clouée au lit, je voudrais que vous la vissiez ! »

Du comportement aux mécanismes cérébraux

Tout au long de ce premier chapitre, nous avons examiné comment la psychologie cognitive a décomposé les étapes successives de la lecture. Depuis le traitement de l'image rétinienne jusqu'à la reconnaissance invariante des lettres, l'accès à la prononciation, la reconnaissance des morphèmes et la résolution des conflits entre ces différents niveaux de représentation, la mécanique humaine de la lecture étonne par son impressionnante efficacité. En une fraction de seconde et sans aucun effort conscient, notre système nerveux résout un problème de reconnaissance visuelle qui demeure hors de portée des logiciels actuels. Il le fait avec des moyens pratiquement optimaux, étant donné la résolution du capteur de l'œil : reconnaissance parallèle des caractères disponibles, résolution des ambiguïtés, accès rapide à un mot parmi 50 000 possibles…

L'efficacité des algorithmes de la lecture ne laisse pas de surprendre. Comment le cerveau humain peut-il s'avérer aussi étroitement adapté à un problème pour lequel il n'a pas évolué ? Comment l'architecture cérébrale d'un étrange primate bipède devenu chasseur-cueilleur s'est-elle ajustée aussi finement, en quelques milliers d'années, aux difficultés que soulève la

reconnaissance de l’écriture ? Pour tenter d’y voir plus clair, examinons à présent quelles régions du cerveau servent à la lecture. Existe-t-il des « aires de la lecture », au même titre que l’on parle des aires motrices ou de celles du langage ? Sont-elles les mêmes chez un lecteur du français et du japonais ? En bref, peut-on parler d’un mécanisme cérébral universel de la lecture ?

Chapitre 2
Le cerveau au pied de la lettre

Quelles régions du cerveau contribuent à la lecture, et comment sont-elles organisées ? Dès 1892, le neurologue français Joseph-Jules Déjerine découvre que la lésion d'une partie des aires visuelles de l'hémisphère gauche entraîne la perte sélective et totale de la capacité de lire. Depuis une quinzaine d'années, l'imagerie cérébrale a confirmé le rôle essentiel de cette région dans la lecture. Présente au même endroit chez tous les individus et dans toutes les cultures, cette aire répond automatiquement aux mots écrits, même lorsqu'ils sont présentés trop brièvement pour être consciemment détectés. En moins d'un cinquième de seconde, elle extrait l'identité du mot sans se laisser perturber par des changements superficiels de forme, de taille ou de position des lettres. Elle transmet ensuite le résultat de cette analyse visuelle à deux grands ensembles de régions, situées dans des lobes temporaux et frontaux, qui représentent respectivement la sonorité et le sens des mots.

« Nous sommes absurdement accoutumés au miracle de quelques signes écrits capables de contenir une imagerie immortelle, des tours de pensée, des mondes nouveaux avec des personnes vivantes qui parlent, pleurent, rient. […] Et si un jour nous allions nous réveiller, tous autant que nous sommes, et nous trouver dans l'impossibilité absolue de lire ? »

Vladimir NABOKOV,
Feu pâle (traduction R. Girard et M.-E. Coindreau)

L'observation capitale de Joseph-Jules Déjerine

L'histoire de la neurologie de la lecture commence un matin d'octobre 1887. Ce jour-là, monsieur C., habile négociant en tissus retiré des affaires avec une confortable rente, homme cultivé et grand amateur de musique, s'installe confortablement avec un bon livre… lorsqu'il s'aperçoit avec stupéfaction qu'il ne peut plus lire un mot ! Depuis quelques jours, monsieur C. ressentait quelques faiblesses, des engourdissements de la jambe et du bras droits, ainsi que de très légers troubles de la parole. Ces petites attaques, toutefois, se dissipaient rapidement. Ce matin-là, c'est différent : la lecture lui est rigoureusement impossible. Pourtant, monsieur C. s'aperçoit qu'il sait toujours parler, distinguer avec netteté les objets et les personnes qui l'entourent, et même écrire. Pourquoi, alors, ne parvient-il plus à lire ne fût-ce qu'une seule lettre ?

Persuadé qu'il est atteint de troubles de la vision, qui céderont à l'usage de lunettes appropriées, monsieur C. s'en va consulter le Dr Landolt, puis, le 15 novembre 1887, le célèbre neurologue Joseph-Jules Déjerine, professeur agrégé et médecin de l'hospice de Bicêtre. Au terme d'une enquête psychologique et anatomique exemplaire, ce dernier tirera de l'observation de monsieur C. les premières conclusions solides sur les bases cérébrales de la lecture[46]. « Cécité verbale pure », tel est le nom dont

Déjerine baptisera cette perte sélective de la reconnaissance des lettres et des mots écrits, qui lui suggérera l'existence d'un « centre visuel des lettres » spécialisé pour la lecture.

Qu'établissent Déjerine et Landolt ? Ils démontrent d'abord que le patient ne reconnaît plus une seule lettre ni un seul mot. Confronté à un tableau de lettres,

> « il croit avoir perdu la tête, car il se rend bien compte que les signes dont les noms lui échappent sont des lettres », « il affirme les voir parfaitement », et « esquisse du geste leur forme sans arriver à dire leur nom ». Si on le prie de recopier sur du papier ce qu'il voit, « il y parvient, mais non sans peine, en recopiant les lettres trait après trait, comme s'il s'agissait d'un dessin technique, examinant chaque jambage pour s'assurer de l'exactitude du dessin. Malgré tous ces efforts, il est incapable de nommer les lettres ».

Tel est en effet l'aspect le plus étrange de ce syndrome : le patient n'est aveugle qu'aux lettres et aux mots. Son acuité visuelle est bonne, il reconnaît aisément les objets, les visages, est capable de s'orienter dans un environnement nouveau, d'apprécier un tableau :

> « Si on lui montre des objets, il les nomme sans difficulté. Il indique par leurs noms toutes les parties des instruments contenus dans un album de technique industrielle. Cet examen ne met pas une seule fois sa mémoire en défaut ; les dessins évoquent aussitôt le mot propre et l'idée de l'usage des objets. […] En lui donnant le journal *Le Matin*, qu'il lit souvent, le malade dit : "C'est *Le Matin*, je le reconnais à sa forme", mais il ne peut lire aucune des lettres du titre… »

Certes, l'examen clinique met en évidence quelques déficits visuels. Monsieur C. ne voit plus bien dans la partie droite de l'espace. « Placés dans la moitié droite des champs visuels, les objets y semblent plus obscurs, moins nets que dans l'autre moitié » (ce que les neurologues appellent une hémianopsie droite partielle). Dans cette région, il ne distingue plus les couleurs (hémiachromatopsie) : la moitié droite du monde lui apparaît en noir et blanc. Mais ces déficits ne suffisent pas à expliquer l'immense difficulté de la lecture. Conscient de ses troubles visuels, monsieur C. oriente spontanément son regard afin que les lettres ou les mots qu'on lui demande de lire atterrissent un peu à gauche du point de fixation, là où sa vision est normale. Pourtant, cette stratégie n'améliore en rien sa lecture.

La meilleure preuve, sans doute, que monsieur C. souffre d'un trouble qui concerne spécifiquement les lettres réside dans le fait qu'il reconnaît toujours assez facilement les chiffres. Il est toujours capable de les lire, et même de réaliser des calculs complexes. Cette observation essentielle souligne que la lecture des chiffres ne fait pas appel aux mêmes voies anatomiques que la lecture des lettres et des mots. Sur le plan visuel, toutefois, les chiffres et les lettres ont des formes très semblables et, somme

toute, totalement arbitraires et interchangeables. De fait, d'autres cultures choisissent d'utiliser la forme des lettres pour dénoter les chiffres – en arabe, par exemple, les formes ٧ ,٨ ,٦ ,٥ ,٤, qui ressemblent aux lettres de l'alphabet grec, représentent les chiffres 9, 8, 7, 6, 5. La dissociation chiffres-lettres ne saurait donc s'expliquer par une perte d'acuité visuelle. Aucune paire de lunettes, aussi sophistiquée soit-elle, ne soulagera monsieur C. La perte sélective de la lecture est d'origine cérébrale. La maladie dont souffre monsieur C. nous oblige à postuler une spécialisation corticale propre à la lecture des lettres.

D'autres observations soulignent encore l'étrangeté du déficit. Déjerine insiste sur la remarquable préservation des capacités intellectuelles et verbales de monsieur C., qui s'exprime à la perfection avec un vocabulaire aussi étendu qu'avant son accident. Mieux, s'émerveille Déjerine, l'écriture reste intacte :

> « Spontanément, le malade écrit aussi bien qu'il parle. En comparant de nombreux spécimens d'écriture que je lui fais tracer, on ne note aucune erreur, aucune faute d'orthographe, aucune transposition de lettres […]. L'écriture sous dictée s'exécute également facilement et couramment, mais la lecture de ce que le malade vient d'écrire est absolument impossible. […] Il s'impatiente de ces phénomènes, écrit les lettres les unes après les autres, et dit : "Je sais cependant écrire des lettres, les voici ; pourquoi ne puis-je les lire ?" »

En fait, Déjerine note bien une légère dégradation de l'écriture, mais celle-ci est imputable aux troubles de la vision :

> « Vient-on à l'interrompre dans une phrase qu'il écrit sous dictée, il s'embrouille et ne sait plus où reprendre ses lettres ; de même, s'il fait une faute, il ne peut la retrouver. Autrefois, il écrivait plus vite et mieux, maintenant les caractères sont plus gros, tracés avec une certaine hésitation, car, dit-il, "il n'a plus le contrôle des yeux". En effet, loin de le guider, la vue de ce qu'il écrit semble plutôt le troubler, si bien qu'il préfère écrire les yeux fermés. »

La préservation de l'écriture va de pair avec celle des gestes. Ainsi le patient parvient-il encore à lire si on l'autorise à s'aider d'un geste qui esquisse les contours de la lettre. « C'est donc le sens musculaire qui réveille le nom de la lettre ; et la preuve, c'est qu'on peut lui faire dire un mot les yeux fermés en conduisant sa main dans l'air pour lui faire exécuter les contours des lettres. » Plus tard, d'autres neurologues montreront que la lecture tactile est également intacte : le patient déchiffre mieux les lettres qu'on lui trace sur la paume de la main, les yeux fermés, que celles qu'on lui met sous les yeux ! C'est une indication précieuse du niveau auquel se situe le déficit : la mémoire motrice des formes des lettres est intacte, seule leur reconnaissance *visuelle* est altérée.

L’alexie pure

Comment peut-on écrire, et même maîtriser l’orthographe des mots les plus rares, sans parvenir à lire une seule lettre ? La maladie de monsieur C. paraît tellement étrange qu’on pourrait s’interroger sur sa rareté même. Ne s’agit-il pas d’un hystérique ou d’un simulateur ? Non, répond Déjerine, car « nous possédons plusieurs belles observations cliniques de [cette] variété de cécité verbale ». De fait, la neurologie moderne va confirmer de façon éclatante les premières observations de Déjerine. On connaît aujourd’hui des centaines de cas de « cécité verbale pure », que l’on appelle aujourd’hui « alexie pure » ou « alexie sans agraphie » (trouble de la lecture sans atteinte de l’écriture)[47].

Pourquoi dit-on que l’alexie est « pure » ? Pour au moins quatre raisons, toutes notées par Déjerine dans son mémoire de 1892, et toutes répliquées depuis :

— le langage oral est intact ;

— l’écriture est intacte ;

— la reconnaissance visuelle des objets, des visages, des dessins, et même des chiffres, reste largement préservée[48] ;

— la reconnaissance tactile ou gestuelle des lettres est normale.

L’alexie pure constitue ainsi une entité clinique caractéristique, certes peu fréquente, mais remarquablement cohérente dans ses traits majeurs, au point que l’on retrouve aisément aujourd’hui des patients très similaires au cas rapporté par Déjerine. Dans le détail, cependant, une source de variabilité sépare nettement deux catégories de patients[49]. Certains, comme monsieur C., ne parviennent plus à lire ni les mots ni même les lettres isolées. Ils éprouvent parfois même des difficultés à dire si une lettre majuscule et une lettre minuscule se correspondent[50]. D’autres, cependant, conservent la faculté de nommer la plupart des lettres. Ainsi parviennent-il toujours à déchiffrer les mots en décryptant laborieusement, une par une, chacune de leurs lettres. Le déficit prend alors la forme d’un extrême ralentissement du temps de lecture, qui devient proportionnel au nombre de lettres que comprend le mot (figure 2.1). Cette lecture lettre à lettre révèle, comme en négatif, le déficit dont souffrent les patients alexiques : contrairement aux lecteurs normaux, ils ne parviennent plus à traiter en parallèle l’ensemble des lettres qui composent un mot[51].

Des lésions révélatrices

Le cas de monsieur C. indique qu'il doit exister, dans le cerveau, des régions spécialisées dans la lecture, capables de transmettre en parallèle aux aires du langage des informations sur l'identité visuelle des lettres et des mots. Mais quelles sont les aires concernées ? Déjerine est conscient que seule l'autopsie peut donner à son observation « la valeur rigoureuse d'une expérience de physiologie ». Le 16 janvier 1892, un peu plus de quatre ans après l'accident initial, monsieur C. décède d'un second infarctus cérébral. Le neurologue, qui l'a suivi régulièrement, note que « malgré de patients exercices et beaucoup d'efforts, il n'a jamais pu réapprendre la signification des lettres et des mots ». Déjerine pratique aussitôt l'autopsie, dont il dévoilera les résultats à la Société de biologie quelques semaines plus tard. Celle-ci révèle que l'hémisphère droit est totalement intact, tandis que des lésions anciennes affectent la partie postérieure de l'hémisphère gauche. Elles occupent « le lobe occipital et plus particulièrement les circonvolutions de la pointe occipitale, de la base du cunéus, ainsi que celles du lobule lingual et du lobule fusiforme[52] ». Le dessin original de la main de Déjerine est reproduit en figure 2.1. On y voit bien le contour de ces grandes « plaques jaunes atrophiques », cicatrices tardives de l'accident vasculaire qui, quatre ans auparavant, avait rendu monsieur C. incapable de lire le moindre mot.

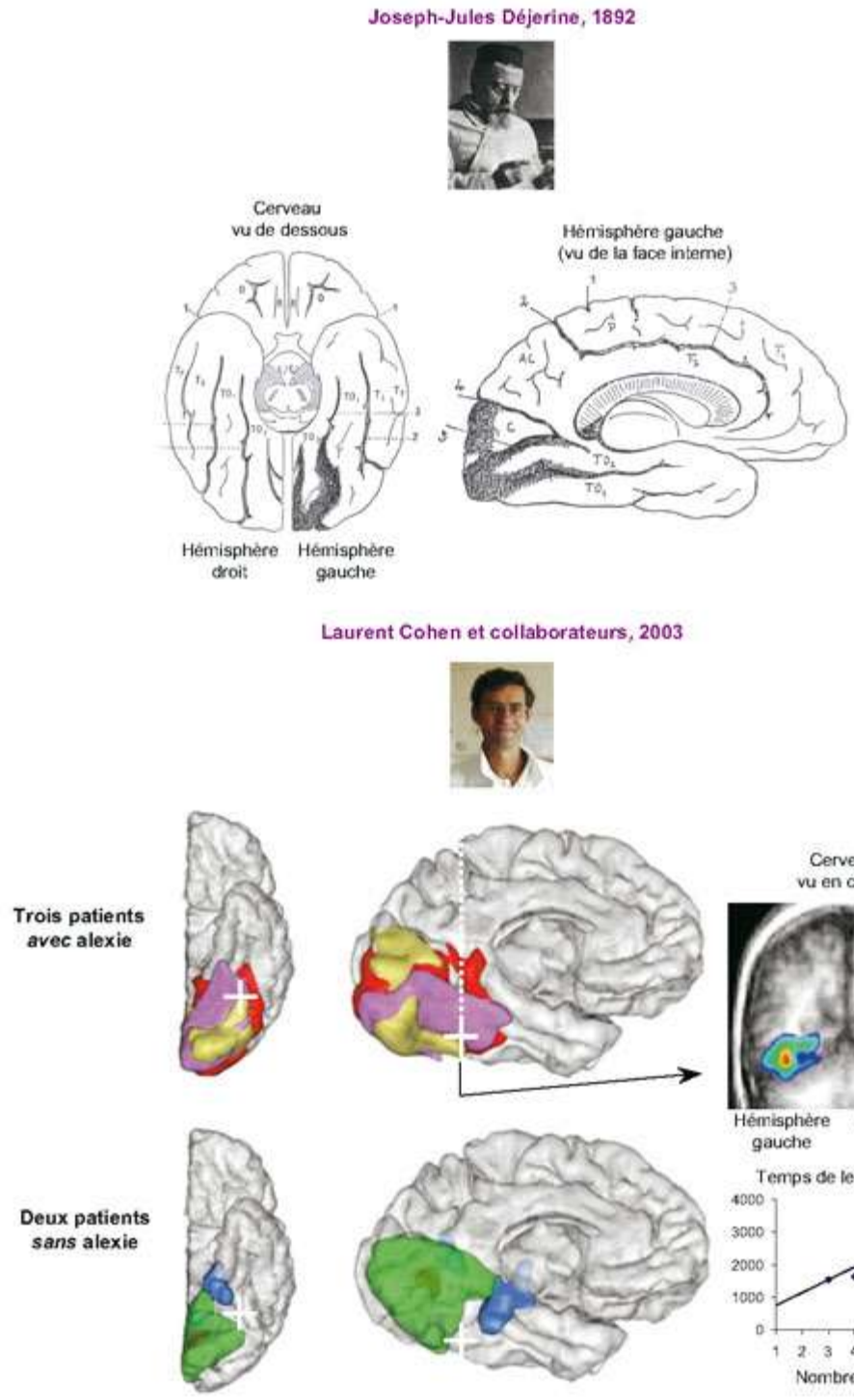


Figure 2.1 Après un accident vasculaire cérébral, il n'est pas rare qu'un patient perde la capacité de lire et devienne donc *alexique*. L'autopsie du premier patient alexique, décrit par Déjerine en 1892 (en haut), montre des lésions similaires à celles de patients contemporains, visualisées en imagerie par résonance magnétique (en bas, d'après Cohen et coll., 2003). Dans les deux cas, c'est la partie arrière de l'hémisphère gauche qui est lésée. L'intersection des lésions et leur confrontation avec celles d'autres patients qui ne souffrent pas d'alexie permettent d'isoler un site précis, la région occipito-temporale ventrale (croix blanche) dont la lésion affecte systématiquement la lecture. Les patients alexiques parviennent parfois à déchiffrer les mots lettre à lettre, mais leur temps de lecture, contrairement à celui d'un lecteur normal, croît avec le nombre de lettres – ils ont perdu la reconnaissance rapide et parallèle des mots.

Comment la lésion des régions visuelles affecte-t-elle sélectivement la lecture ? Pour interpréter son observation anatomique, Déjerine fait appel à la notion de déconnexion. En effet, la lésion de monsieur C. affecte en partie ce que les neurologues appellent la substance blanche, c'est-à-dire ces vastes faisceaux de connexions nerveuses qui relient des régions corticales distantes. De plus, elle concerne le pôle occipital, siège du traitement visuel. Enfin, elle affecte pour partie le cortex visuel gauche et pour partie les connexions qui font entrer dans l'hémisphère gauche les informations visuelles en provenance des régions visuelles droites (corps calleux).

Déjerine suppose donc que la lésion affecte la transmission des informations visuelles en direction d'une région qu'il appelle le « centre visuel des lettres » et qu'il localise, sur la base d'autres observations, dans le gyrus angulaire, aussi appelé pli courbe, un plissement de l'écorce cérébrale situé à la base de la région pariétale gauche. Selon Déjerine, ce centre visuel des lettres lui-même est intact – ce qui expliquerait que le patient sache encore écrire, orthographier ou reconnaître la forme des lettres par le geste. Toutefois, privée de ses entrées visuelles en provenance des deux hémisphères, cette région est littéralement déconnectée : elle ne reçoit plus les informations nécessaires à la lecture et se trouve donc incapable d'appliquer ses connaissances sur les lettres aux stimuli visuels. Ainsi, le patient n'est pas aveugle : il voit encore les formes des lettres et sait les traiter comme des objets visuels quelconques ; mais il ne peut pas les *reconnaître* comme des lettres ou des mots (« cécité verbale »).

L'analyse moderne des lésions

Plus de cent ans après, le neurologue Laurent Cohen et moi-même[53], comme d'autres chercheurs[54], avons repris la démarche de Déjerine. Nous pouvions compter sur des instruments d'observation nouveaux : grâce à l'imagerie par résonance magnétique, il nous était notamment possible de nous affranchir de la contrainte de l'autopsie pour observer *in vivo* les lésions. C'est ainsi que nous avons observé plusieurs cas d'alexie pure. Pratiquement tous ces patients avaient des lésions dans le même secteur que monsieur C. : la région occipito-temporale gauche. Ces lésions sont fréquemment observées à la suite d'un infarctus de l'artère cérébrale

postérieure gauche qui irrigue cette région. À titre d'exemple, la figure 2.1 montre les lésions observées chez trois de ces patients : toutes affectent la partie arrière et inférieure de l'hémisphère gauche.

De nos jours, l'IRM permet d'aller plus loin que ne le pouvait Déjerine. Il devient facile de digitaliser les lésions et les superposer dans un espace anatomique standardisé qui compense en partie les variations individuelles de taille et de forme du cerveau. Ainsi est-il possible de répondre à une question que Déjerine ne pouvait aborder que par un travail indirect de recoupement : peut-on séparer, parmi les régions atteintes, celles dont la lésion est directement responsable de l'alexie, et celles qui sont responsables d'autres troubles tels que la perte de vision des couleurs ? Ce travail ne fait que commencer, mais sa logique est simple : il suffit d'examiner un grand nombre de patients et de noter dans quelle mesure la lésion de telle ou telle région est systématiquement associée à une alexie. En examinant l'intersection des lésions de nombreux patients, on peut s'affranchir de la variabilité aléatoire des accidents vasculaires et isoler le ou les territoires corticaux associés de façon systématique aux troubles de la lecture. En éliminant, de cette image d'intersection, les secteurs lésés chez les patients qui ne souffrent *pas* d'alexie, on parvient enfin à isoler les régions nécessaires et suffisantes à la lecture.

Une telle analyse, esquissée sur la figure 2.1, suggère que les régions les plus postérieures de l'hémisphère gauche ne jouent pas de rôle spécifique dans la lecture. On sait aujourd'hui que ces régions occipitales sont impliquées dans l'analyse précoce des signaux visuels, analyse qui n'est pas propre à la lecture, mais contribue à la reconnaissance de la forme et de la couleur de tous les objets. Une lésion dans ces régions n'entraîne donc que des troubles visuels non spécifiques. Ces patients ont un champ visuel amputé et ne voient pas bien à droite du point où se fixe leur regard. Ils ont souvent des difficultés à voir la partie droite des mots et à programmer des mouvements des yeux vers la droite. Quoique ces troubles induisent un ralentissement, en particulier dans la lecture des phrases, ils doivent être distingués soigneusement de l'alexie pure proprement dite[55].

En revanche, un peu plus en avant sur la face ventrale de l'hémisphère gauche se trouve une petite région qui est presque toujours atteinte chez les patients alexiques, et dont la lésion entraîne, presque toujours, une alexie pure. C'est la région occipito-temporale gauche – retenez bien ce terme, car

il reviendra fréquemment, et n'hésitez pas à vous référer au diagramme anatomique de la figure 2.2 pour bien comprendre sa place dans le circuit de la lecture. C'est là, en effet, que se situe la région clé pour l'analyse visuelle des mots. Comme nous allons le voir, un vaste ensemble de données suggère que cette région joue un rôle prépondérant dans l'analyse de la forme des lettres, leur reconnaissance, et leur assemblage en mots. C'est pourquoi Laurent Cohen et moi avons proposé de l'appeler la *région de la forme visuelle des mots*[56].

L'interprétation de Déjerine doit donc être corrigée. Nous pensons aujourd'hui que ce n'est pas le gyrus angulaire qui permet la reconnaissance visuelle des lettres, mais une région distincte de celui-ci, située sur la face ventrale du cerveau (voir le schéma de la figure 2.2). L'erreur de Déjerine vient pour partie du fait que, chez monsieur C., cette région n'est pas directement lésée (cela se voit clairement sur la figure 2.1). Sans doute était-elle seulement déconnectée, exactement comme le supposait le grand neurologue. Celui-ci se méprenait simplement sur la localisation de la région déconnectée, qui appartient au système visuel ventral et non pas à la région plus dorsale du gyrus angulaire.

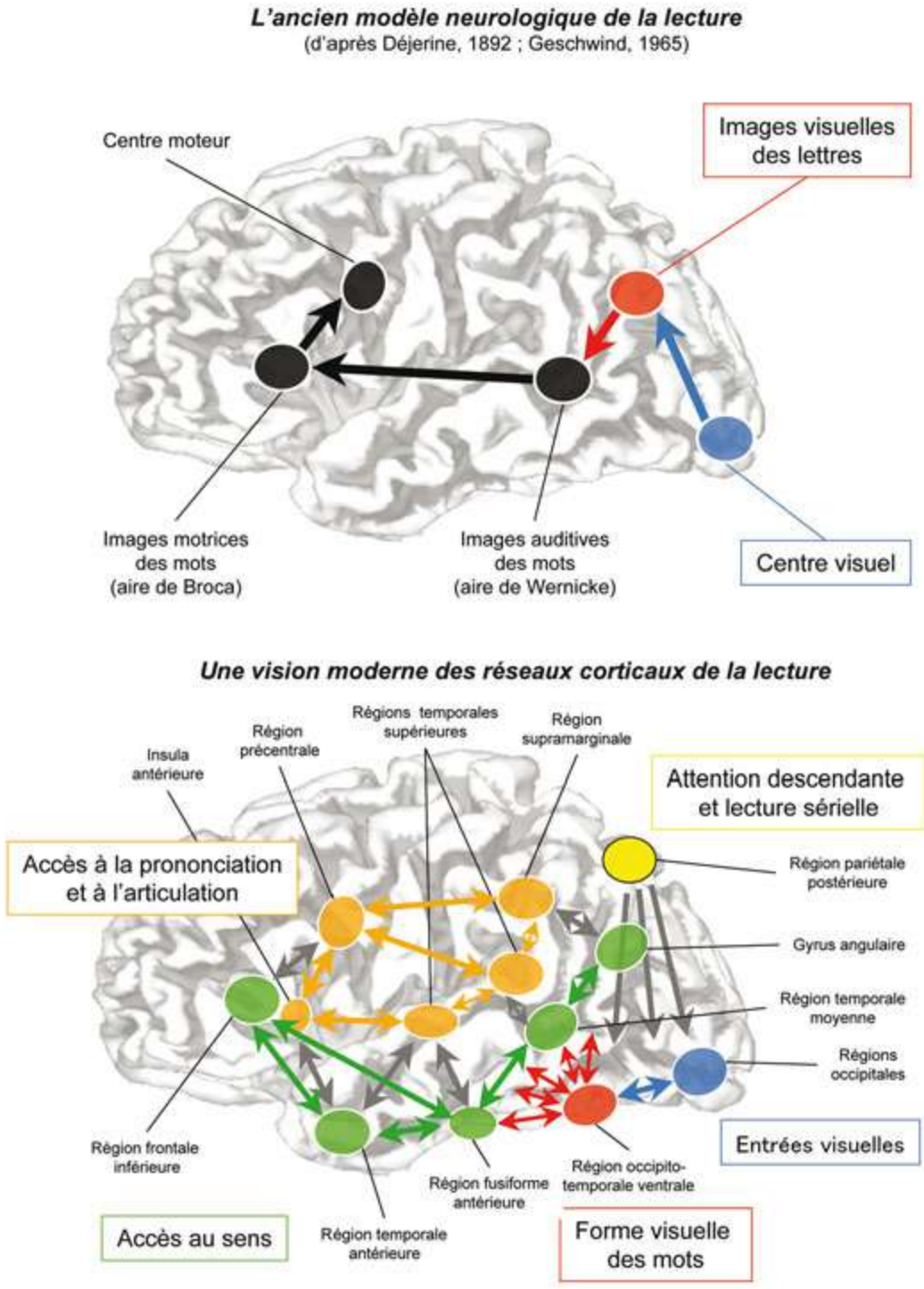


Figure 2.2 Le modèle neurologique classique de la lecture (en haut) est aujourd'hui remplacé par un schéma parallèle et foisonnant (en bas). La région occipito-temporale gauche reconnaît la forme visuelle des mots. Elle distribue les informations visuelles à de nombreuses régions, réparties dans tout l'hémisphère gauche, qui sont impliquées à des degrés divers dans la représentation du sens, de la sonorité et de l'articulation des mots. Toutes les régions en vert et orange ne sont pas spécifiques à la lecture : elles interviennent au premier chef dans le traitement du langage parlé. Apprendre à lire consiste donc à mettre en connexion les aires visuelles avec les aires du langage. Toutes les interconnexions entre régions, qui sont bidirectionnelles, ne sont

pas encore connues en détail. La connectivité cérébrale réelle est probablement bien plus foisonnante encore que ne le suggère ce schéma.

Nous savons maintenant qu'il y a au moins trois manières dont les lésions peuvent empêcher le fonctionnement de la région de la forme visuelle des mots[57]. La situation la plus simple est évidemment lorsqu'une lésion la détruit directement. Cependant, il se peut également qu'elle soit déconnectée en amont, c'est-à-dire coupée de ses entrées visuelles, comme chez monsieur C. ; ou bien, qu'elle soit déconnectée en aval, et ainsi empêchée de transmettre le résultat de ses calculs à d'autres régions cérébrales. Dans tous les cas, le résultat est le même : une sévère incapacité à reconnaître les mots écrits. Nous verrons plus loin qu'il existe également des cas de déconnexion partielle, où cette région ne reçoit plus qu'une partie des informations visuelles. Il se peut, par exemple, qu'elle ne reçoive plus que les entrées visuelles de l'hémisphère gauche. On aboutit alors à des phénomènes encore plus paradoxaux : un patient qui ne sait lire que les mots qu'on lui présente du côté gauche !

Il y a un autre point, plus fondamental, sur lequel Déjerine se méprenait : c'est l'architecture générale des réseaux cérébraux de la lecture. Déjerine, entraînant à sa suite d'autres experts tel le grand neurologue américain Norman Geschwind[58], envisageait un circuit linéaire et somme toute assez simple. Les images visuelles étaient envoyées vers le gyrus angulaire, où elles entraient en contact avec le répertoire d'images visuelles des mots. L'activité se propageait ensuite à la région de Wernicke, siège des images auditives des mots, puis à la région de Broca, site de leurs formes articulatoires, et enfin au cortex moteur qui se chargeait du contrôle des muscles. En somme, quelques étapes successives suffisaient à passer de la vision à l'audition, à l'articulation et la prononciation. Derrière cette vision strictement sérielle de la lecture se devine l'influence des analogies mécaniques en vogue au XIX^{e} siècle. Le fonctionnement de la mécanique cérébrale était alors comparé à la propagation de l'électricité ou à la répartition de la pression dans une machine à vapeur. En remontant plus loin encore, il y a comme une filiation entre les premiers schémas des neuropsychologues et les diagrammes hydrauliques suivant lesquels René Descartes expliquait nos réflexes par la circulation des « esprits animaux »

dans la tuyauterie du corps. Le modèle de l'arc réflexe restait la vision dominante.

On se saurait donc reprocher à Déjerine de n'avoir pas anticipé un siècle de psychologie et de neurosciences. Une vision beaucoup plus complexe, foisonnante et parallèle est venue remplacer le modèle sériel des neurologues. Nous savons aujourd'hui, pour avoir tenté de la programmer sur nos ordinateurs, à quel point la reconnaissance des formes visuelles est un problème difficile, qui ne saurait se résumer à la simple excitation de quelques « images » dans le cerveau. Comme nous l'avons vu au premier chapitre, toute une série d'opérations complexes est nécessaire afin d'aboutir à une reconnaissance invariante des caractères écrits.

Encore celle-ci n'est-elle qu'une première étape de la lecture. À partir de la représentation visuelle de la chaîne des lettres, de multiples informations doivent encore être retrouvées : les racines des mots, leur sens, leur sonorité, la façon de les articuler… Chacune de ces opérations fait appel à une ou plusieurs aires corticales distinctes. Par ailleurs, les connexions corticales ne s'établissent pas sous forme de chaînes linéaires : chaque région en contacte plusieurs autres en parallèle. Toutes les connexions sont d'ailleurs réciproques : chaque fois qu'une région A contacte une région B, la région B projette également en retour vers la région A.

Sur la base de ces principes, j'ai tenté d'esquisser, au bas de la figure 2.2, ce que pourrait être une vision moderne de la lecture dans le cerveau. Toutes les régions qui apparaissent dans ce diagramme contribuent de façon certaine à la lecture des mots. Pourtant c'est un schéma qui doit être considéré comme provisoire. Paradoxalement, il est sans doute encore beaucoup trop simple, car de nombreuses régions et connexions manquent encore à l'appel. La différence la plus évidente entre cette vision moderne et le diagramme de Déjerine est l'abandon d'une vision sérielle de l'activation cérébrale, au profit d'un schéma divergent dans lequel de très nombreuses régions cérébrales peuvent être activées en parallèle.

Le lecteur aura compris que, depuis Déjerine, nous avons perdu beaucoup de nos certitudes. Il est bien difficile, aujourd'hui, d'attribuer une fonction bien précise à chacune des régions de notre diagramme, comme le faisait Déjerine lorsqu'il étiquetait le cortex en images visuelles, auditives et motrices. Nous avons certes une vision plus raffinée de la manière dont le

cerveau fonctionne. Mais, paradoxalement, cette nouvelle vision complique grandement la tâche du neuropsychologue qui se demande s'il est encore possible de parvenir à une compréhension intuitive de circuits aussi complexes.

Le cerveau du scientifique parviendra-t-il à comprendre le cerveau du lecteur ? Si la question reste en suspens, nous avons toutefois fait d'importants progrès dans la compréhension de quelques régions cérébrales, et notamment celle de la forme visuelle des mots. Sur le diagramme moderne de la lecture, cette région occupe une place stratégique : elle joue le rôle de goulot d'étranglement, par lequel transitent toutes les informations visuelles avant d'être distribuées à de très nombreuses régions de l'hémisphère gauche. Cette position particulière explique que sa lésion ou sa déconnexion puissent avoir des effets aussi dramatiques que ceux observés chez monsieur C. : la perte totale du traitement des mots écrits, comme s'il s'agissait de taches d'encre sans signification. Mais comment cette région analyse-t-elle les mots écrits ?

Lire dans le cerveau

Depuis près de vingt ans, les techniques d'imagerie cérébrale fonctionnelle sont venues révolutionner l'étude du cerveau humain en permettant, très littéralement, de « lire dans le cerveau ». Non seulement nous pouvons observer les processus de la lecture chez les malades, mais également chez les lecteurs sains. L'immense avantage qu'offrent ces méthodes réside dans leur capacité de visualiser directement l'activité du cerveau d'une personne volontaire, au moment même où celle-ci effectue une opération mentale telle que la lecture d'un mot. Qui sait, en effet, comment le cerveau se modifie à la suite d'une lésion cérébrale ? Une lésion peut avoir des effets à distance, en déconnectant d'autres régions et en les privant ainsi d'une voie d'entrée. Il n'est pas rare également que, dans les semaines qui suivent la lésion, le cerveau malade se réorganise et réapprenne une fonction perdue en faisant appel à des circuits différents de ceux du cerveau sain. Enfin, les lésions cérébrales surviennent au hasard : leur taille est souvent importante et leur position biaisée par la distribution des artères, de sorte qu'il est bien difficile d'en tirer des conclusions fines sur l'anatomie cérébrale fonctionnelle. Si nous ne disposions pas de moyens

de visualisation du cerveau normal, notre tâche serait comparable à celle d'un horloger qui, pour apprendre son métier, ne disposerait que de vieux réveils à moitié cassés.

L'imagerie cérébrale repose sur un principe très simple, et déjà anticipé par Lavoisier : comme n'importe quel organe, le cerveau consomme plus d'énergie lorsqu'il est au travail que lorsqu'il est au repos. Dans son *Premier Mémoire sur la respiration des animaux* (1789), Lavoisier, après avoir discuté de la quantité de l'air que consomme une personne qui soulèverait un poids à une certaine hauteur, envisage la mesure du métabolisme cérébral :

> « Ce genre d'observation conduit à comparer des emplois de forces entre lesquelles il semblerait n'exister aucun rapport. On peut connaître, par exemple, à combien de livres en poids répondent les efforts d'un homme qui récite un discours, d'un musicien qui joue d'un instrument. On pourrait même évaluer ce qu'il y a de mécanique dans le travail du philosophe qui réfléchit, de l'homme de lettres qui écrit, du musicien qui compose. Ces effets, considérés comme purement moraux, ont quelque chose de physique et de matériel qui permet, sous ce rapport, de les comparer avec ceux que fait l'homme de peine. »

Reste à mesurer ces efforts mentaux, non seulement dans leur globalité, mais en tout point du cortex. En 1988 paraît un article qui inaugure, de façon spectaculaire, l'ère de l'imagerie cérébrale fonctionnelle[59]. Steve Petersen et ses collègues font date en révélant, pour la première fois, l'organisation fonctionnelle des aires cérébrales du langage à l'aide d'une méthode nouvelle : la tomographie par émission de positons.

De quoi s'agit-il ? La méthode fait appel à la physique nucléaire. Il s'agit d'injecter, à des sujets volontaires, une faible dose d'eau radioactive dont l'atome d'oxygène a été remplacé par de l'oxygène 15. Par le biais de la circulation sanguine, cette eau marquée se répand rapidement dans tout le corps. Cependant, la radioactivité s'accumule plus rapidement dans les régions où le débit sanguin est le plus élevé. Dans le cerveau, ce sont précisément les régions où l'activité neuronale est la plus intense. L'image de la distribution de radioactivité reflète donc directement la localisation des réseaux cérébraux activés.

Mais comment la détecter sans ouvrir la boîte crânienne ? L'oxygène 15 a été sélectionné car il émet un positon, l'antiparticule de l'électron, qui se désintègre rapidement en émettant deux photons de haute énergie. Des couronnes de détecteurs, disposées tout autour de la tête, comptabilisent ces désintégrations. Elles permettent, par le biais d'un puissant algorithme, d'en déduire la distribution de la radioactivité dans l'espace. On parvient donc à

une vue tridimensionnelle, coupe par coupe, des régions activées du cerveau – d'où le terme de « tomographie », racine grecque signifiant « dessin en coupe ».

Innovation essentielle, Petersen et ses collaborateurs ont proposé à leurs volontaires une hiérarchie de tâches de complexité croissante. Ils ont d'abord obtenu des mesures à l'état de repos, alors que la personne ne pense à rien de précis et ne reçoit aucune stimulation particulière. Puis, ils ont effectué d'autres mesures d'activité cérébrale au cours de la présentation passive de mots, soit écrits, soit parlés ; puis, lorsque la personne répète ces mots à voix haute ; et, enfin, lorsque la personne génère une association verbale en inventant un usage plausible pour chaque mot (par exemple « manger » si le stimulus est « gâteau »). En comparant ces conditions deux à deux, les auteurs estimaient pouvoir isoler les régions impliquées successivement dans la reconnaissance des mots (écrits ou parlés), l'articulation, et la manipulation interne du sens des mots.

Les images issues de cette expérience ont fait la une des journaux du monde entier, et appartiennent maintenant à l'histoire des sciences. On y découvrait la toute première décomposition des réseaux cérébraux du langage (figure 2.3). Certes, nous savons maintenant que cette image est trop simple. Un peu comme le modèle de Déjerine, il lui manque de nombreuses régions essentielles, et les étiquettes qui y figurent demandent à être affinées. Néanmoins, les résultats essentiels ont été répliqués par la suite. Très logiquement, la vision d'un mot écrit active les régions occipitales bilatérales, qui sont associées aux étapes précoces de la vision. Plus important, la lecture active également une région ventrale de l'hémisphère gauche située à la frontière entre les lobes occipitaux et temporaux, tout près du site où Déjerine avait localisé la région de monsieur C. Nous savons maintenant qu'il s'agit de l'aire de la forme visuelle des mots.

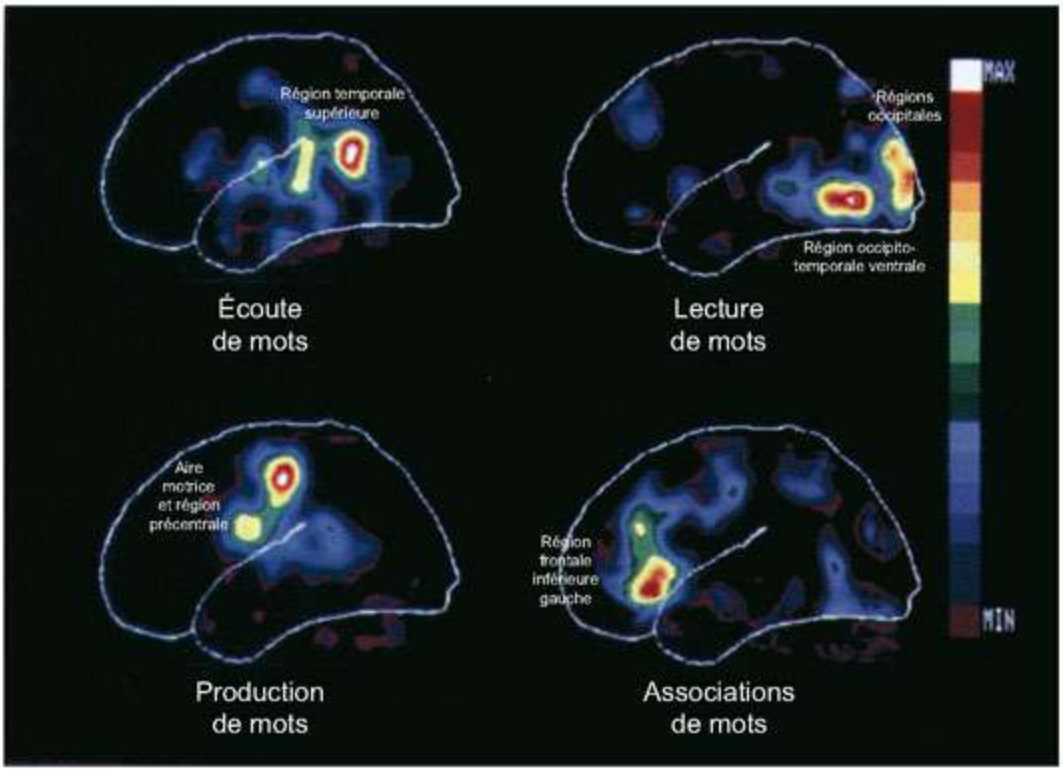


Figure 2.3 Une image historique : les aires cérébrales du langage mises en évidence pour la première fois en 1988 par la caméra à positons (d'après Petersen et coll., 1989). Par rapport à la fixation d'un point, la lecture muette (en haut à droite) active les processus de reconnaissance visuelle des mots situés dans la partie arrière de l'hémisphère gauche, tout particulièrement les régions occipitales et la région occipito-temporale ventrale. L'information est ensuite transmise, selon la tâche, aux régions impliquées dans la représentation du son (en haut à gauche), de l'articulation (en bas à gauche) ou du sens (en bas à droite).

Qu'en est-il des autres codes des mots ? L'audition d'un mot parlé active des régions bien distinctes : les aires temporales supérieures, siège des régions auditives primaires, et le cortex temporal moyen gauche, impliqué dans l'analyse de la parole. La production du langage, quant à elle, fait appel à la région précentrale gauche, proche de l'aire de Broca, ainsi qu'aux cortex moteurs droit et gauche. Enfin, les associations sémantiques activent puissamment le cortex préfrontal inférieur gauche.

De toutes ces régions, une seule semble jouer un rôle central et spécifique dans la lecture : la région occipito-temporale gauche, celle-là même que l'analyse des lésions identifie comme le siège de l'alexie pure. En effet, Petersen et ses collègues notent que cette région est la seule à s'activer uniquement pour les mots écrits, pas pour les mots parlés, sans toutefois appartenir aux régions visuelles de bas niveau qui s'activent à la vue de stimuli simples comme des damiers. Elle se situe donc à la charnière

entre l’analyse visuelle et le reste du système linguistique. Porte d’entrée vers les aires du langage, cette petite région visuelle de l’hémisphère gauche analyse les images et signale : oui, il y a bien des lettres, il s’agit (par exemple) d’un C, d’un O et d’un R – information cruciale que d’autres régions du cerveau se chargeront de décoder en sons et en sens.

Nous lisons tous avec le même circuit cérébral

L’importance de la région occipito-temporale gauche dans la lecture est confirmée par une seconde méthode d’imagerie, qui a aujourd’hui largement supplanté la tomographie par émission de positons : l’imagerie fonctionnelle par résonance magnétique ou *IRM fonctionnelle*. Cette technique présente le double intérêt de ne faire appel qu’à des machines présentes dans tous les hôpitaux, et de ne pas nécessiter l’injection de produits radioactifs.

Dans l’IRM fonctionnelle, c’est le sang lui-même, présent dans tous les tissus, qui sert de produit de contraste. La méthode tire parti des propriétés magnétiques de l’hémoglobine du sang, qui varient spontanément en fonction de la présence d’oxygène. *Grosso modo*, une molécule d’hémoglobine qui n’est pas oxygénée se comporte comme un petit aimant : elle perturbe le champ magnétique et atténue donc le signal de résonance magnétique. Par contre, lorsqu’une molécule d’oxygène se fixe sur l’hémoglobine, celle-ci devient transparente au champ magnétique. Le signal de résonance magnétique n’est donc plus perturbé, et il augmente de façon mesurable. Or les régions cérébrales où l’activité neuronale est intense reçoivent, dans les secondes qui suivent, un afflux de sang oxygéné. C’est ainsi que l’on peut mesurer, avec un petit délai, comment l’activité cérébrale évolue au fil du temps en chaque point du cerveau. Selon la métaphore qu’affectionne mon collègue Denis Le Bihan, spécialiste de l’IRM, c’est un peu comme si l’on tentait de deviner la position des fleurs, dans un jardin, en examinant quelles plates-bandes arrose le jardinier… C’est une méthode indirecte, mais qui fonctionne remarquablement bien.

Le principal avantage de l’IRM est de fournir une série de mesures de l’activité cérébrale avec une très grande rapidité. Au cours d’un seul examen, on peut facilement obtenir quelques centaines d’images du cerveau entier, à l’échelle de quelques millimètres, à raison d’une image toutes les

deux ou trois secondes (contre une image toutes les 10 ou 15 minutes pour la caméra à positons).

Atout supplémentaire, les mesures d'IRM fonctionnelle sont très sensibles. Il suffit de présenter quelques mots écrits, cachés au milieu d'une série de formes géométriques, pour voir aussitôt s'allumer transitoirement la région occipito-temporale gauche, siège de la forme visuelle des mots. Ainsi n'est-il plus nécessaire d'établir des moyennes sur de longues périodes et sur plusieurs personnes. L'IRM permet de démontrer en quelques minutes, chez n'importe quel volontaire qui sache lire, la présence d'une intense activité évoquée par les mots écrits dans la région occipito-temporale gauche.

Grâce à l'IRM, nous pouvons enfin répondre à une question cruciale : quelle est la variabilité d'une personne à l'autre dans le réseau cérébral de la lecture ? La réponse est surprenante : absolument toutes les personnes que nous avons étudiées montrent une activation de la même région au cours de la lecture. Bien entendu, sa position précise varie quelque peu, ne fût-ce qu'à cause du plissement des sillons de l'écorce cérébrale, dont l'organisation varie d'une personne à l'autre – un peu comme une feuille de papier que l'on froisse et qui prend chaque fois des plis différents. Toutefois, en dépit de ces changements superficiels de l'anatomie cérébrale, nous possédons tous une région de la forme visuelle des mots, et elle se retrouve toujours au même endroit : sur le flanc du sillon occipito-temporal, un creux du cortex qui borde la région fusiforme de l'hémisphère gauche (figure 2.4)[60].

Un système de coordonnées rudimentaire permet de repérer les activations dans l'espace du cerveau selon trois axes de coordonnées standardisés. Dans ce système, inventé par le neurochirurgien français Jean Talairach, les coordonnées de la région qui nous intéresse sont reproductibles à environ 5 millimètres près, d'un individu à l'autre, mais aussi d'un laboratoire à l'autre[61]. Cela reste vrai, comme nous le verrons dans un instant, chez les lecteurs d'écritures différentes de la nôtre, telles que le chinois ou le japonais[62]. Notons également que la direction de l'écriture ne joue aucun rôle dans cette latéralisation à gauche : chez les lecteurs de l'hébreu, qui se lit de droite à gauche, la position de cette région est exactement la même, toujours à proximité du sillon occipito-temporal

gauche[63]. En d'autres termes, nous lisons tous avec le même circuit cérébral.

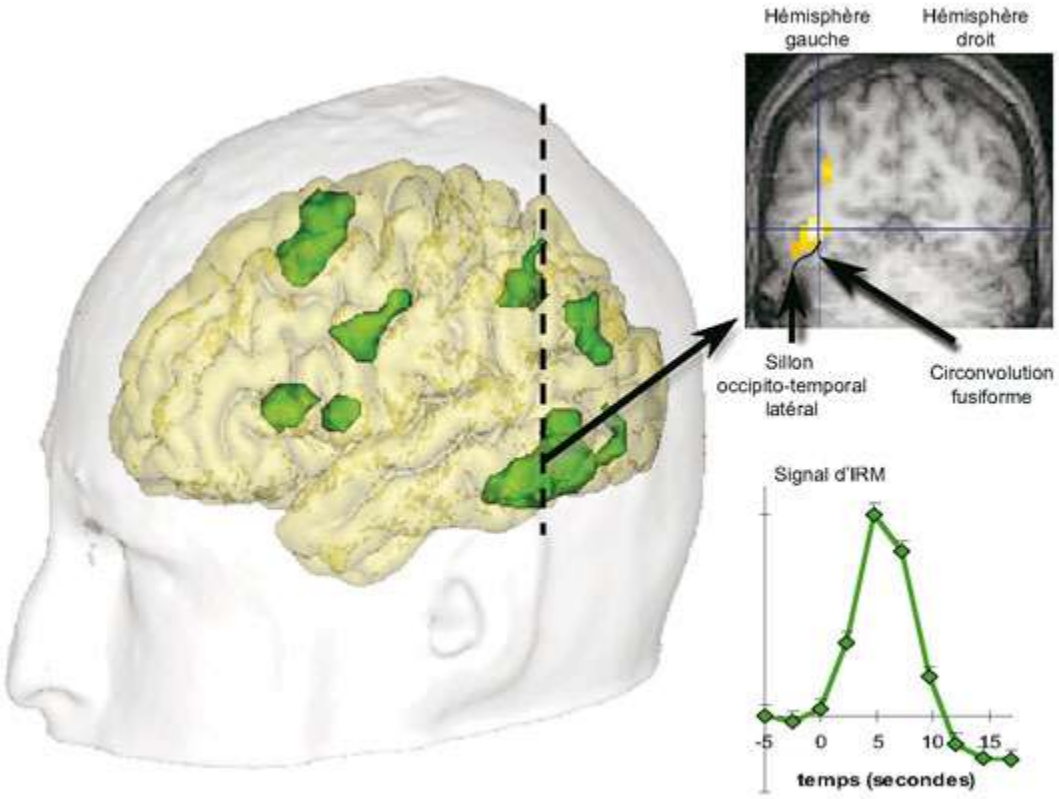


Figure 2.4 L'IRM fonctionnelle permet de localiser, en quelques minutes, les régions activées lors de la lecture. Les participants lisent mentalement des mots présentés à un rythme aléatoire. Après chaque mot, les régions activées voient leur signal d'IRM augmenter et atteindre un pic environ cinq secondes plus tard. Parmi le réseau activé, la région de la forme visuelle des mots apparaît systématiquement aux abords du sillon occipito-temporal latéral gauche, sur le bord de la circonvolution fusiforme.

L'étonnante reproductibilité de cette région cérébrale complique encore le paradoxe de la lecture. Voilà une activité culturelle, inventée de toutes pièces il y a moins de cinq mille ans, dont les formes de surface varient immensément d'un pays à l'autre. Chacun d'entre nous maîtrise plus ou moins bien la lecture, et l'a probablement apprise par des moyens passablement différents. Certains ont ânonné leur b-a-ba, d'autres ont tracé les lettres avec le doigt selon la méthode Montessori, d'autres encore ont subi les affres de la méthode globale. Comment se peut-il que chacun de nous, sans exception, fasse appel à la même région cérébrale pour reconnaître les mots écrits ?

Une région cérébrale pour les mots écrits ?

Le mystère s'épaissit encore lorsque l'on observe que les propriétés fonctionnelles de cette région sont également fortement reproductibles d'un individu à l'autre. Chacune des sept personnes scannées sur la figure 2.5 présente une activation sélective aux mots écrits, sans aucune trace d'activation lorsque ces personnes entendent les mêmes mots[64]. C'est un phénomène extrêmement stable, qu'avaient déjà rapporté Petersen et ses collègues en 1998 : en général, l'écoute du langage parlé n'active pas cette région, qui est strictement dédiée à l'analyse visuelle des mots.

Les seules exceptions connues à ce jour concernent des conditions très particulières dans lesquelles on incite le volontaire à imaginer la manière dont s'écrit un mot ou un son. Ainsi, de faibles activations de cette région sont observées lorsque l'on demande à une personne de détecter si un mot contient une lettre « descendante » telle que p, q ou j, dont les jambages descendent en dessous de la ligne d'écriture[65]. On peut également l'activer en demandant à des Japonais d'imaginer qu'ils écrivent un mot dans la notation kanji – ce qui nécessite qu'ils visualisent le tracé complexe des caractères dans l'espace[66]. Enfin, il suffit de demander à des volontaires de faire des différences fines entre deux énoncés, par exemple « dip » et « tip », pour voir cette région s'allumer, comme si le support des lettres facilitait la différenciation des sons[67]. Le point commun de toutes ces situations pourrait être de solliciter les images des lettres à partir de la parole. Une activation rétrograde emprunterait les voies de la lecture en sens inverse de la montée normale de l'information. Hormis ces conditions particulières, la région occipito-temporale ventrale ne s'active que si l'on présente des mots écrits, pas des mots parlés.

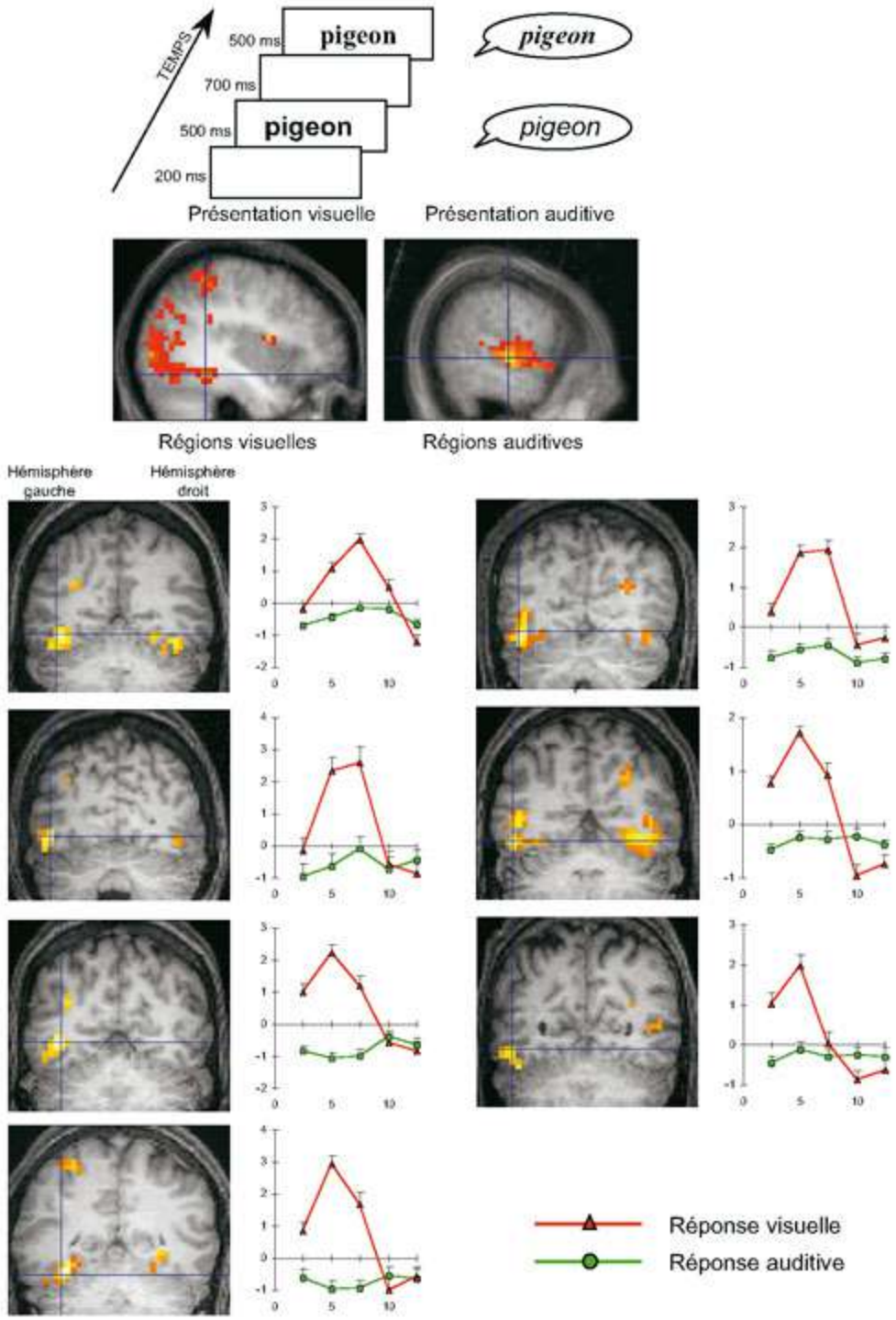


Figure 2.5 L'activation de la région occipito-temporale gauche s'observe aisément chez n'importe quelle personne qui a appris à lire. Dans cette expérience, on présente aux participants deux mots, écrits ou parlés. Ils doivent juger si ces mots sont identiques ou différents. Chez sept personnes différentes, les mots écrits activent la région occipito-temporale gauche, à une position étonnamment reproductible en dépit de la variabilité des plissements du cortex. Les mots parlés, eux, n'activent pas cette région (d'après Dehaene et coll., 2002).

Cette région s'intéresse donc à l'analyse visuelle des mots. Toutefois, une question se pose : s'agit-il d'une région à tout faire, capable de traiter n'importe quel objet visuel ? Ou bien est-elle spécialisée pour la lecture ? Là encore, la réponse est surprenante : une partie de cette région répond de préférence aux mots, plus qu'à de nombreux autres stimuli visuels ; et, de nouveau, cette préférence est universelle et présente chez tous les individus au même endroit du cerveau.

Tout se passe comme s'il existait, au sein de cette région, une division du travail. La reconnaissance des maisons et des paysages fait appel aux régions ventrales les plus proches de la ligne médiane qui sépare les deux hémisphères. En s'éloignant vers le flanc des hémisphères, on rencontre ensuite une région qui répond particulièrement à la vue de visages. Plus loin, on parvient au sillon occipito-temporal où se nichent quelques secteurs particulièrement sensibles à la vision des mots. Enfin, sur le bord du cerveau, tout un pan du cortex temporal inférieur répond de préférence aux objets et aux outils (figure 2.6)[68].

La neuroradiologue Aina Puce a exploité la sensibilité et la résolution spatiale de l'IRM fonctionnelle afin d'explorer cette organisation fonctionnelle chez de nombreux individus. Elle leur a présenté de petites séries d'images composées soit de visages d'inconnus, soit de suites de lettres sans signification telles que XGFST, qu'ils devaient observer attentivement. Chez toutes les personnes examinées, deux petites régions spécialisées occupaient des positions voisines et systématiquement reproductibles : les visages activaient la surface inférieure du cortex tandis que les mots activaient une région plus latérale dans le sillon cortical immédiatement voisin (figure 2.7)[69].

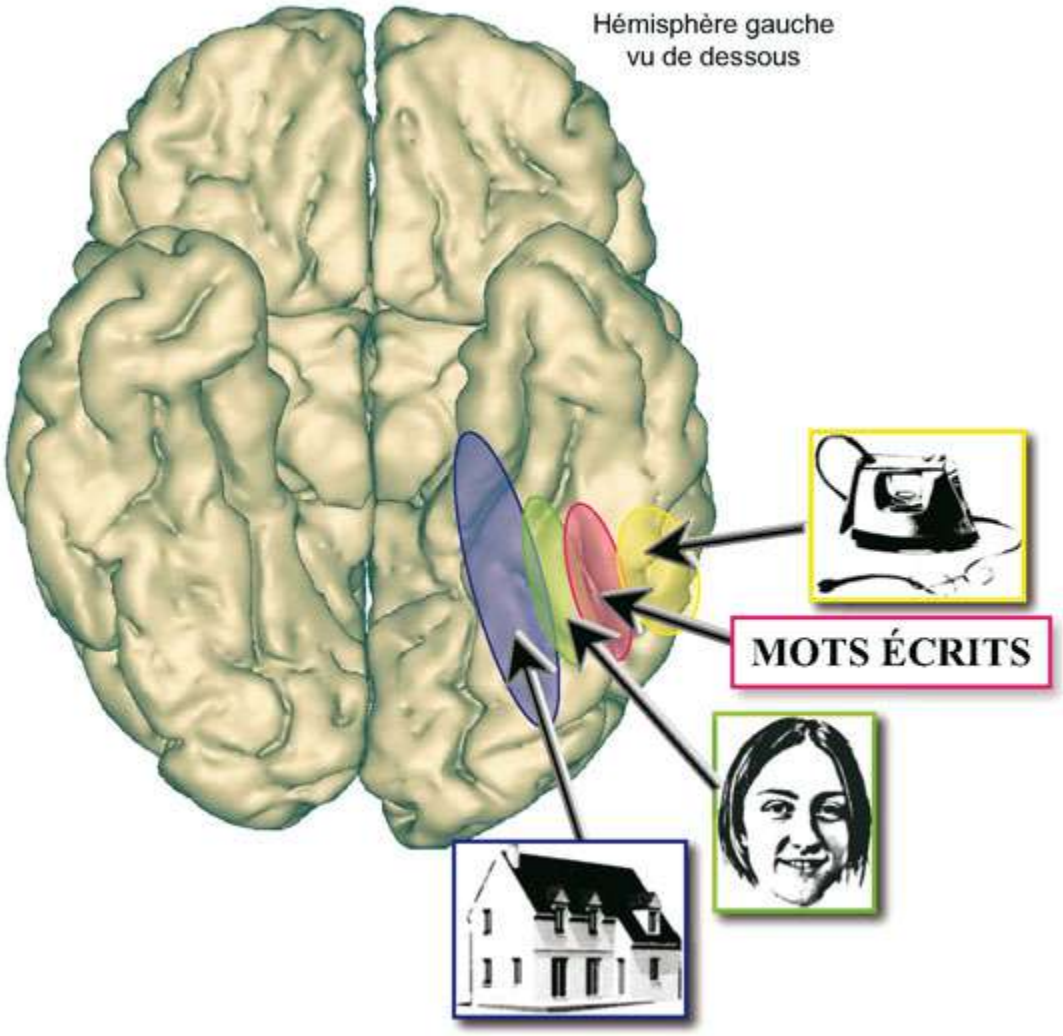


Figure 2.6 Une mosaïque de détecteurs visuels spécialisés occupe la région visuelle ventrale. Chaque secteur du cortex répond préférentiellement à une catégorie d'objets. L'ordonnancement de ces réponses, depuis les maisons jusqu'aux visages, aux mots et aux objets, est le même chez toutes les personnes. Ainsi, la lecture active une aire occipito-temporale reproductible, toujours située entre les réponses aux visages et les réponses aux objets (d'après Ishai et coll., 2000 et Puce et coll., 1996).

Il ne faudrait cependant pas caricaturer cette spécialisation du cortex. À l'échelle où nous l'étudions, il s'agit plutôt d'une préférence locale pour certains objets visuels. Comme l'ont montré Jim Haxby et ses collaborateurs du National Institute of Health, l'organisation du cortex visuel ne se réduit pas à un simple découpage en vastes zones de sélectivité absolue aux frontières nettement tracées. En réalité, les différentes catégories visuelles se recouvrent au sein de notre cerveau et évoquent des fluctuations continues de l'activité du cortex visuel[70]. Ainsi, au sein des régions qui répondent maximalement aux mots, même les autres catégories

d’objets (visages, maisons, outils, animaux, etc.) induisent des activations substantielles. N’oublions pas que chacun des cubes élémentaires de cortex que nous parvenons à visualiser avec l’IRM fait 2 à 3 mm de côté et comprend de l’ordre du million de neurones. Il n’est donc pas surprenant que toutes ces cellules n’aient pas la même préférence. Si l’on augmente la résolution spatiale jusqu’à l’échelle du millimètre cube, la sélectivité devient spectaculaire : certains secteurs du cortex ne répondent plus qu’à une seule catégorie d’objets, les visages par exemple[71]. Si l’on y introduit une électrode (chez l’animal bien sûr), l’immense majorité des neurones que l’on y trouve préfèrent nettement les visages à tout autre stimulus[72].

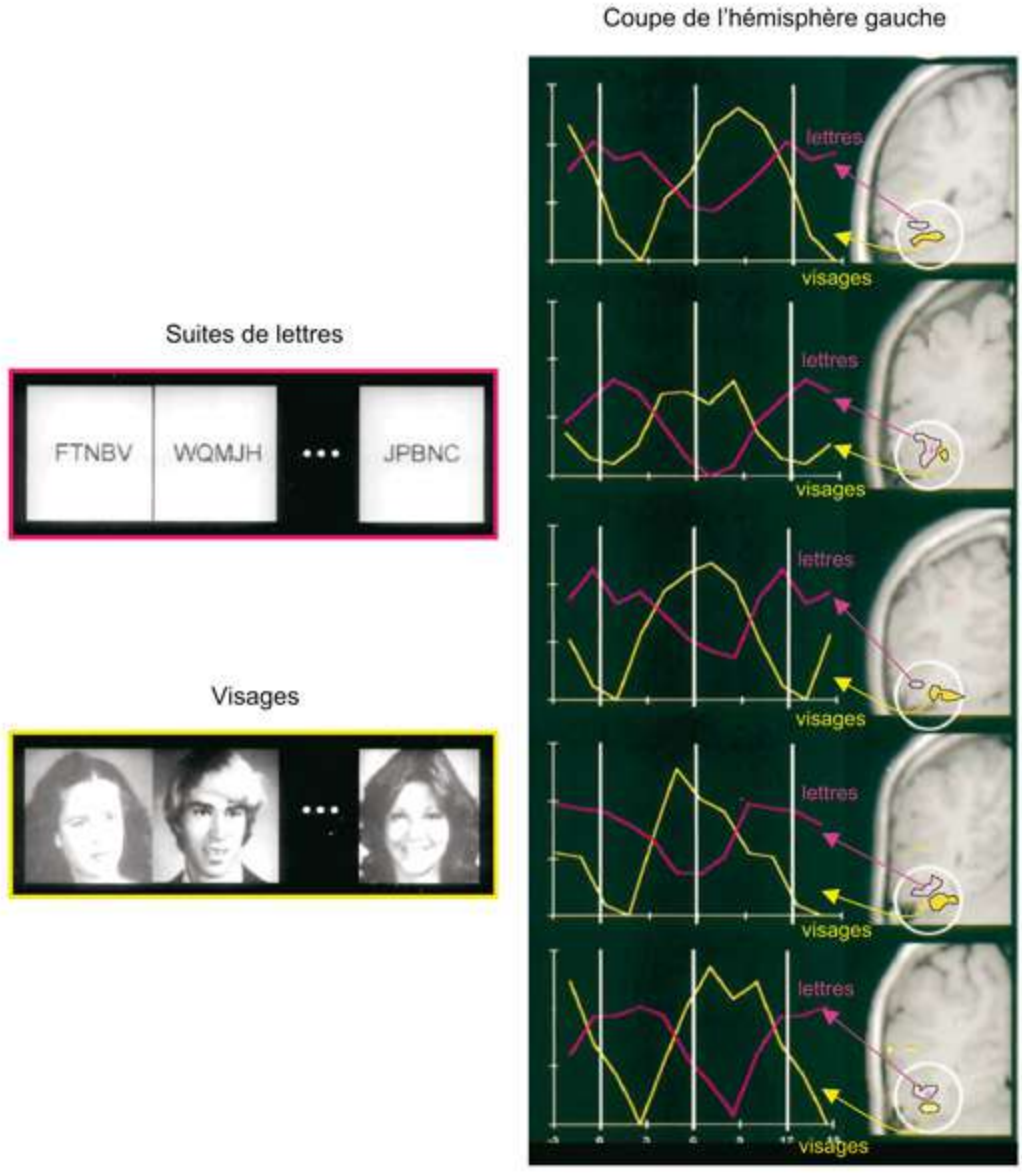


Figure 2.7 L'imagerie cérébrale met en évidence une sélectivité très fine du cortex temporal ventral pour les visages et les caractères écrits. La présentation visuelle, en alternance, de visages et de chaînes de lettres active des territoires distincts de la région visuelle ventrale gauche. Ces territoires présentent une distribution similaire chez cinq personnes différentes – les lettres sont toujours à gauche des visages (d'après Puce et coll., 1996).

L'image qui émerge de ces études du cortex visuel ventral est celle d'une mosaïque de neurones individuellement très sélectifs, mais qui s'entremêlent pour former des zones de préférence partielle. Certaines régions préfèrent les lettres, d'autres les chiffres, les visages, les objets… Peut-être ne devrait-on pas parler de la région corticale des visages ou des mots, mais seulement du pic de réponse aux mots ou aux visages. Chaque pic occupe une position reproductible, mais dans leur ombre surgissent

d’autres sommets, moins proéminents, mais tout aussi importants pour la lecture. Chaque catégorie d’objets dessine ainsi, sur la surface du cortex temporal, un paysage complexe de collines et de vallées.

Le cerveau en temps réel

Nous venons de voir que les visages et les mots activent des secteurs distincts du cortex. Mais il existe également une autre différence importante entre ces deux catégories d’images. Lorsque nous lisons un mot, l’hémisphère gauche joue un rôle prépondérant. Pour reconnaître les visages, c’est l’hémisphère droit qui est fondamental. Ainsi, même si les deux hémisphères sont initialement stimulés à parts égales, un tri s’opère rapidement : en quelques centièmes de seconde, les mots sont orientés vers l’hémisphère gauche, et les visages vers le droit. La latéralisation rapide en faveur de l’hémisphère gauche fait partie des propriétés essentielles de la lecture.

Jamais ce tri précoce n’aurait été découvert si l’on n’avait disposé que de la caméra à positons ou de l’IRM fonctionnelle. Ces méthodes, fondées sur la mesure du débit sanguin cérébral, sont trop lentes pour suivre en temps réel les palpitations de l’activité cérébrale. Lorsqu’une région corticale est sollicitée, plusieurs secondes s’écoulent avant que le débit sanguin n’augmente. Ainsi, les images obtenues sont-elles comparables à celles des astronomes qui collectent la lumière passée des étoiles : avec l’IRM fonctionnelle, nous visualisons l’état d’activité du cerveau tel qu’il était il y a quelques secondes. Ce délai introduit inévitablement une imprécision qui limite considérablement l’étude du déroulement temporel de l’activité cérébrale.

Fort heureusement, d’autres techniques d’imagerie, l’électro- et la magnéto-encéphalographie, permettent de suivre l’activité du cerveau en temps réel. Comment fonctionnent ces méthodes ? Elles reposent sur la mesure indirecte des courants qui circulent au sein des neurones. Chaque neurone possède des arborisations, les dendrites, par lesquelles il écoute les messages des milliers d’autres neurones avec lesquels il est en contact. Dès qu’elles sont stimulées, les dendrites sont parcourues de minuscules courants électriques. Quand des milliers de dendrites, toutes alignées perpendiculairement à la surface du cortex, sont activées en même temps,

leurs courants s'additionnent. Leur somme cesse alors d'être négligeable, au point qu'on parvient à la mesurer de l'extérieur du crâne.

Deux méthodes s'offrent à nous. L'électro-encéphalographie, appliquée pour la première fois à l'homme par Hans Berger en 1924, consiste à mesurer, avec un voltmètre très sensible, les différences de potentiel de l'ordre du microvolt que ces courants neuronaux induisent à la surface du scalp. La magnéto-encéphalographie, quant à elle, exploitée dès 1968 par David Cohen et ses collègues du Massachusetts Institute of Technology, détecte les minuscules variations de champ magnétique induites par ces mêmes courants. Plus chère que l'électro-encéphalographie, elle requiert des précautions techniques minutieuses, puisque le signal de magnéto-encéphalographie est de l'ordre du femtotesla, soit un milliard de fois moins que le champ magnétique terrestre.

Les deux méthodes présentent une excellente précision temporelle, puisque la propagation de l'activité électro-magnétique du cerveau jusqu'aux capteurs est pratiquement immédiate. On obtient ainsi une série d'instantanés du cerveau en action. Appliquées à la lecture, ces méthodes ont révélé la très grande vitesse avec laquelle le cerveau du lecteur effectue un premier tri des images qu'il reçoit.

Ainsi Antti Tarkiainen et ses collègues de l'Université d'Helsinki ont-ils mesuré l'activité magnétique du cerveau lors de la présentation de mots et de visages (figure 2.8)[73]. Leurs résultats révèlent deux étapes majeures du traitement visuel dans le cortex. Dans une première phase, observée environ 100 millisecondes après l'apparition des images sur la rétine, les deux types d'images ne sont pas distingués : mots et visages activent des régions comparables du pôle occipital, tout à l'arrière de la tête. Ces régions effectuent une première analyse de l'image, probablement pour en extraire les formes élémentaires (traits, courbes, surfaces…). À ce stade du traitement de l'information, le cerveau ne sait pas encore à quel stimulus il a affaire. Mais seulement 50 millisecondes plus tard, l'information visuelle commence à être triée. Les mots évoquent une ample réponse fortement latéralisée à l'hémisphère gauche. L'électro-encéphalographie permet également de la mesurer sous la forme de voltages négatifs qui émergent soudainement, vers 170 millisecondes, dans la partie inférieure et arrière de la tête. Leur amplitude est bien plus grande au-dessus de l'hémisphère

gauche que du droit. Pour les visages, c'est l'inverse : les potentiels dominent nettement au-dessus de l'hémisphère droit.

Une reconstruction des sources électro-magnétiques localise l'activité cérébrale à la partie postérieure du sillon occipito-temporal – la même région que nous avions identifiée avec l'IRM fonctionnelle. Ainsi, la combinaison des méthodes d'imagerie permet d'affirmer que cette région, dans l'hémisphère gauche, joue un rôle précoce et spécifique dans la reconnaissance des mots. Même si les deux hémisphères hébergent des compétences pour la reconnaissance des mots et des visages, l'hémisphère gauche présente un biais important pour la lecture et le droit pour les visages. Lire et reconnaître un visage sont des opérations tellement différentes que notre système visuel ne peut pas se contenter de mécanismes génériques de traitement d'images. Sitôt passées les toutes premières étapes, des mécanismes spécialisés se mettent en œuvre.

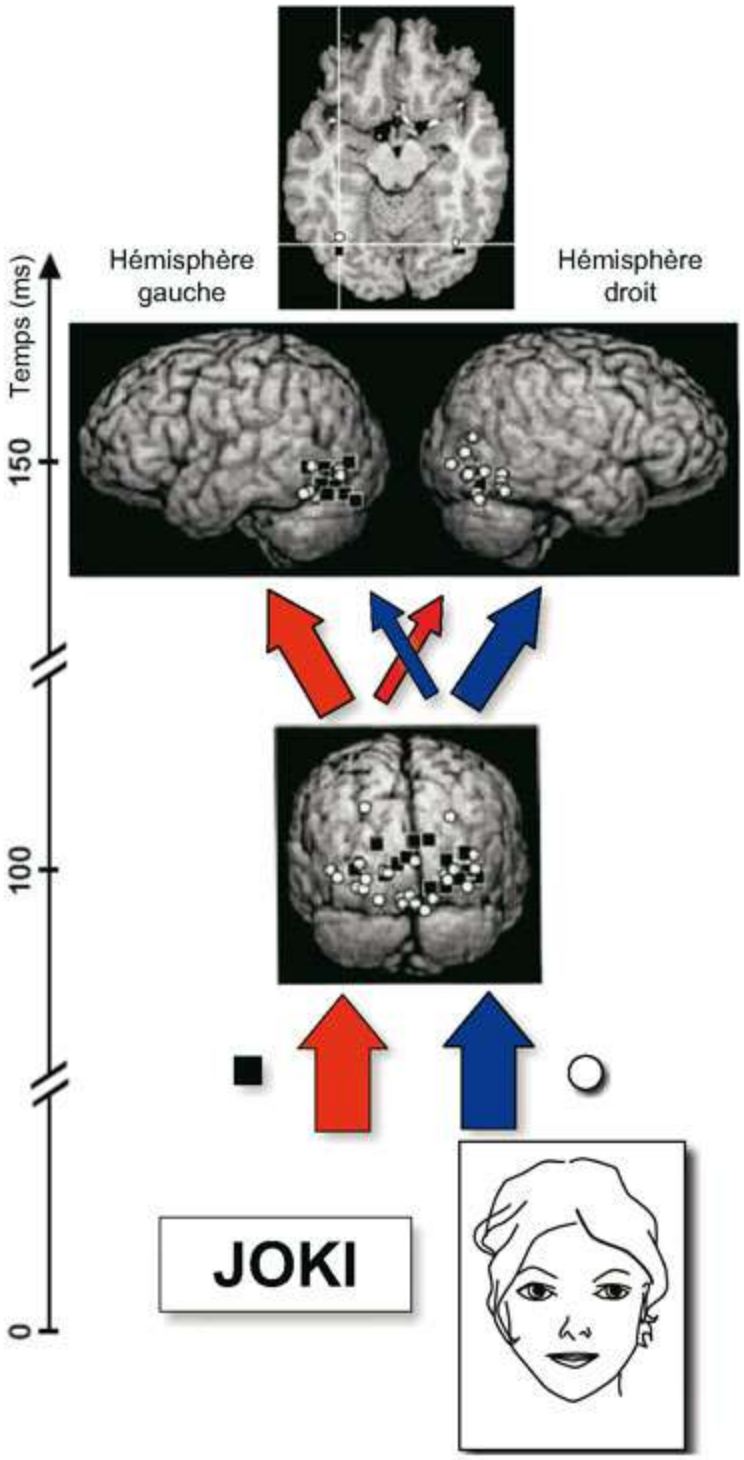


Figure 2.8 La magnéto-encéphalographie permet de suivre, à l'échelle de la milliseconde, le décours temporel de l'activité cérébrale au cours de la reconnaissance des mots et des visages. Vers 100 ms, ces catégories n'évoquent pas encore de différence détectable au sein de la région occipitale. Après 150 millisecondes, les mots sont canalisés vers la région occipito-temporale ventrale de l'hémisphère gauche, tandis que les visages activent principalement la région symétrique de l'hémisphère droit (d'après Tarkiainen et coll., 2002).

Des électrodes dans la tête

La spécialisation de certaines aires visuelles pour la lecture se révèle parfois de façon encore plus immédiate. Chez certains patients, il est possible d'enregistrer directement l'activité cérébrale à l'aide d'électrodes placées sur le cerveau, ou même implantées en profondeur dans le cortex ou les noyaux gris sous-jacents. Cette implantation d'électrodes intracrâniennes reste une opération exceptionnelle, et il est évident qu'on ne la pratique jamais sans raison médicale. Elle est principalement utilisée dans l'exploration de l'épilepsie. Certains patients qui souffrent d'épilepsie sévère sont rebelles à tout traitement par les médicaments. Il faut alors envisager une intervention chirurgicale afin d'éliminer la région cérébrale anormale appelée « foyer », d'où partent les crises. C'est une opération qui réussit dans la grande majorité des cas sans laisser de graves séquelles. Cependant, elle nécessite d'identifier avec précision le foyer de l'épilepsie. L'implantation d'électrodes reste la meilleure méthode pour y parvenir. Pendant quelques jours, le patient est bardé de dizaines d'électrodes autour de la zone probable du foyer. Au contact même du cortex, elles sont en mesure de capter les signaux électriques environnants avec la plus grande sensibilité. Dans les centres les plus modernes, on enregistre l'activité cérébrale en continu, et tout est filmé nuit et jour. Ainsi, le moindre début d'orage cérébral pourra être reconstitué *a posteriori*, et son origine traquée jusqu'à sa source. Mais, entre deux crises, rien n'empêche d'analyser l'activité électrique de régions cérébrales qui, bien souvent, conservent un fonctionnement proche de la normale. Avec le consentement du patient, on peut également examiner les réponses du cerveau à des stimulations extérieures telles que des mots ou des visages.

Les neurologues Truett Allison, Gregory McCarthy et leurs collègues de l'Université de Yale se sont ainsi lancés dans un impressionnant programme de recherches qui, au fil des années, les a conduits à enregistrer les réponses intracrâniennes de plus d'une centaine de patients[74]. Leur technique chirurgicale consiste à enrober les lobes temporaux et occipitaux de bandes d'électrodes placées sous la dure-mère, directement en contact avec la surface corticale (figure 2.9). Espacées de 5 ou 10 millimètres, celles-ci fournissent alors un panorama des étapes de la lecture, avec une très haute précision tant spatiale que temporelle.

La méthode des électrodes implantées a confirmé la rapidité du traitement des mots. Dès 180 ou 200 millisecondes après qu'une image a été présentée sur la rétine, des ondes négatives de très forte amplitude apparaissent sur certaines électrodes de la face ventrale des régions occipitales et temporales. Elles se concentrent dans l'hémisphère gauche pour les mots et dans l'hémisphère droit pour les visages. La surprise réside dans l'extrême spécificité des réponses. Il n'est pas rare qu'une seule électrode montre une réponse massive aux mots alors que ses voisines ne montrent aucune réaction. Plus étonnant encore, une électrode peut répondre vigoureusement aux mots, mais ne présenter aucun frémissement lors de la présentation d'autres catégories d'images telles que des visages, des objets, ou des formes sans signification. Cette découverte implique l'existence de microterritoires corticaux dédiés aux mots et insensibles à toute autre forme de stimulation.

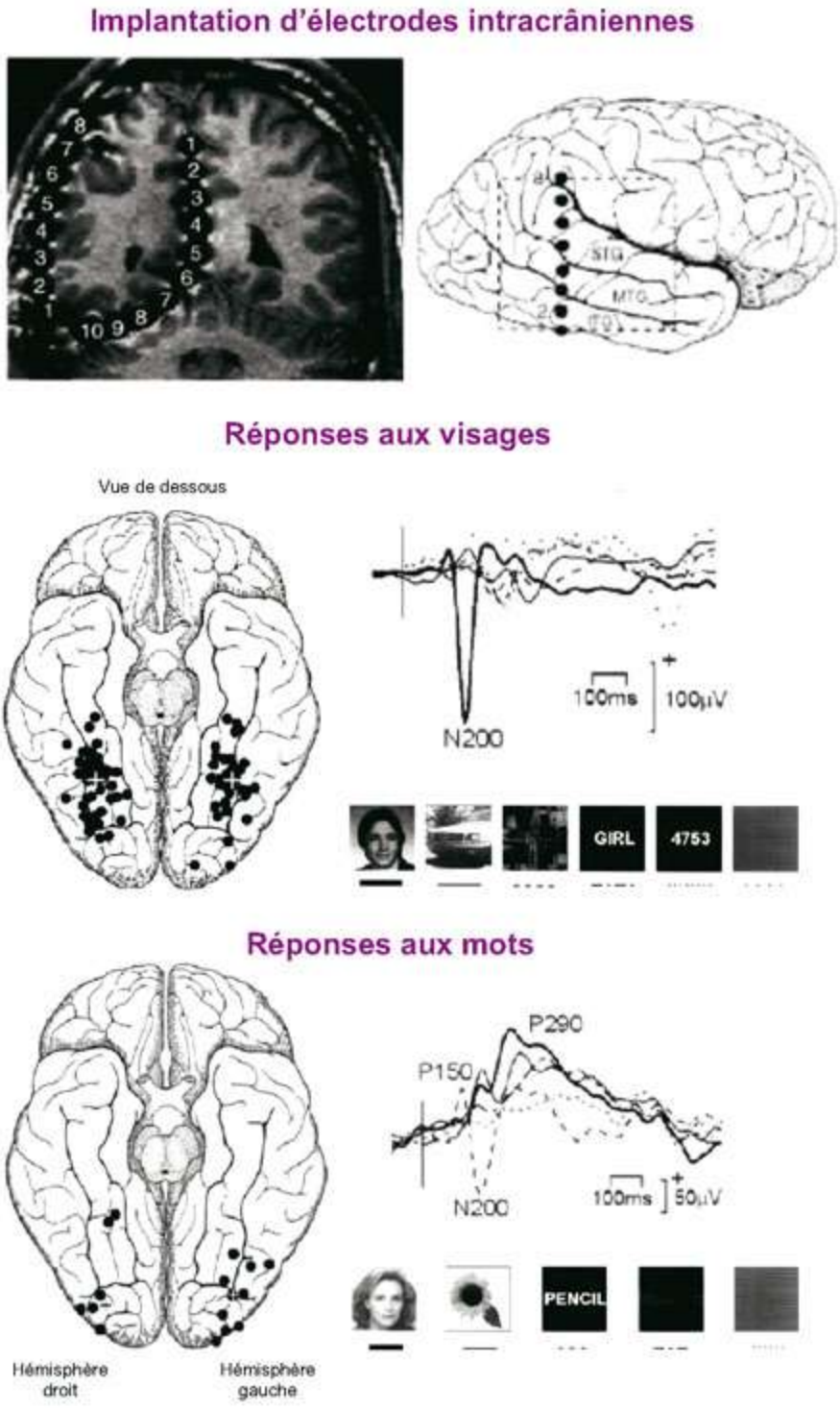


Figure 2.9 L'implantation d'électrodes à la surface du cortex révèle la spécialisation des fonctions corticales avec une remarquable précision spatiale et temporelle. Sur certaines électrodes, le signal électrique dévie brutalement, entre 150 et 200 ms, uniquement lors de la présentation d'une catégorie d'images. Certains secteurs préfèrent les visages, d'autres les mots. En regroupant les données de nombreux patients dans un espace anatomique standardisé, on constate que les visages sont traités préférentiellement dans la région occipito-temporale droite, et les mots dans la gauche (d'après Allison et coll., 1999).

Force est donc de conclure qu'il doit exister des neurones qui répondent aux lettres et aux mots ; que ces neurones sont suffisamment nombreux et synchronisés pour générer, lorsqu'ils déchargent de concert, des potentiels évoqués de taille macroscopique ; qu'ils occupent des régions importantes du cortex cérébral, de l'ordre de plusieurs millimètres carrés, dans lesquels ils dominent très largement toute autre forme de sélectivité visuelle ; et enfin, que ces régions, chez tous les bons lecteurs, se retrouvent dans un secteur similaire, au bord du sillon occipito-temporal.

Au fil de ces recherches, la région occipito-temporale apparaît donc comme une mosaïque de systèmes de reconnaissance spécialisés pour différents aspects du traitement visuel : mots, visages, objets… Toutes ces régions sont entremêlées et distribuées sur la face ventrale du cortex. Chaque personne présente des pics de préférence corticale pour ces catégories d'objets. Plus étonnant encore, ces pics se retrouvent systématiquement à des positions similaires chez tous les individus. La région qui répond aux mots, en particulier, est systématiquement enchâssée entre des régions qui préfèrent reconnaître les visages, et d'autres qui répondent mieux aux objets. Cet ordonnancement systématique appelle une explication.

Dans le cas des visages, Nancy Kanwisher, professeur au Massachusetts Institute of Technology, a proposé une hypothèse évolutionniste simple : chez les primates, où la vie sociale joue un rôle prépondérant, une aire corticale spécialisée aurait évolué pour permettre la reconnaissance des visages[75]. Pourtant, dans le cas de la lecture, l'explication darwinienne ne fonctionne pas. Aucune pression de sélection comparable ne saurait rendre compte de l'existence d'une région sélective aux lettres et aux mots. Comment le cerveau des primates aurait-il pu anticiper l'apparition de l'écriture au point d'y dédier une région ? C'est ainsi que se pose aujourd'hui le paradoxe de la lecture, avec une acuité exacerbée par la précision des nouvelles techniques d'imagerie cérébrale.

Avant de lever un coin du voile, examinons de plus près le rôle exact de la région de la forme visuelle des mots. Comment reconnaît-elle les mots ? Ses réponses reflètent-elles une authentique spécialisation pour les mots, ou une simple préférence pour les traits et les courbes qui composent nos lettres, et qui pourrait alors avoir évolué pour une tout autre raison ? Pour le

savoir, nous allons devoir nous pencher sur des expériences plus sophistiquées que le simple contraste des mots et des visages.

L'invariance de position

L'un des traits les plus impressionnants de notre système visuel est sa capacité d'invariance spatiale : tout bon lecteur parvient à reconnaître les mots, quelle que soit la position qu'ils occupent – à condition bien sûr qu'ils n'excèdent pas la résolution limitée de notre rétine.

Avec Laurent Cohen et Nicolas Molko, j'ai utilisé l'imagerie cérébrale pour montrer que la région occipito-temporale ventrale gauche est à l'origine de cette invariance perceptive[76]. Nous avons tout simplement demandé à nos volontaires de fixer un point sur l'écran et, sans bouger les yeux, de lire mentalement les mots qui apparaissaient à droite ou à gauche de ce point. Pourquoi cette présentation latérale présente-t-elle un intérêt particulier ? Parce qu'il est bien connu que les projections visuelles sont croisées : les mots présentés à gauche de l'écran se projettent sur la moitié droite de la rétine de chaque œil, d'où l'information est envoyée vers les aires visuelles de l'hémisphère droit ; et, de même, les mots présentés à droite de l'écran sont traités initialement dans l'hémisphère gauche. Ainsi, il existe une ségrégation anatomique complète entre ces deux conditions de stimulation – ségrégation que nous avons répliquée dans nos observations. Dans les régions occipitales, l'IRM fonctionnelle montre des activations uniquement du côté opposé à la présentation du mot, notamment dans l'aire visuelle appelée V4. L'enregistrement des potentiels évoqués indique que ce traitement unilatéral du mot se prolonge jusqu'à 160 ou 170 millisecondes après l'apparition du mot (figure 2.10).

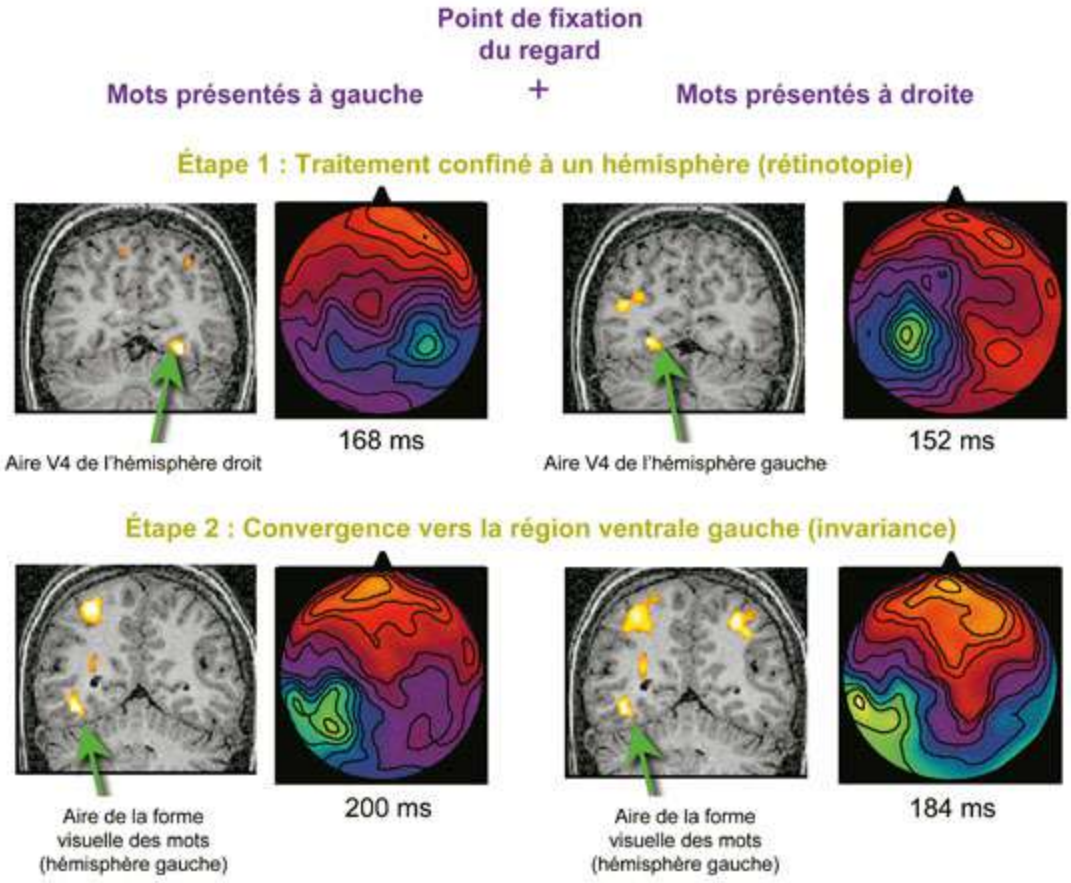


Figure 2.10 Quelle que soit leur position sur la rétine, les mots que nous lisons convergent vers la région occipito-temporale de l'hémisphère gauche (invariance spatiale). Dans cette expérience, les participants lisent des mots présentés à gauche ou à droite du point de fixation du regard. Vers 150-170 ms après l'apparition du mot, une première onde négative apparaît du côté opposé au mot. Elle est associée à l'activation d'une région visuelle située en arrière du cerveau et appelée l'aire V4. À ce stade, l'information visuelle reste confinée à un hémisphère. Vers 180-200 ms, cependant, une seconde négativité apparaît, toujours du côté gauche du scalp, quel que soit le côté de présentation du mot. L'IRM confirme la convergence de l'activation vers la région occipito-temporale ventrale de l'hémisphère gauche (d'après Cohen et coll., 2000).

À ce stade, cependant, l'activité cérébrale change brutalement. En quelques dizaines de millisecondes, toute l'activité bascule dans l'hémisphère gauche. Le changement le plus spectaculaire se produit donc pour les mots présentés du côté gauche et qui sont initialement traités dans l'hémisphère droit : ils sont soudainement transférés à l'autre hémisphère et, à partir de 200 millisecondes, leur traitement ne diffère plus de celui des mots présentés du côté droit.

L'IRM fonctionnelle révèle le site de cette convergence entre les hémisphères. Les signaux issus des régions droite et gauche de la rétine convergent vers la région de la forme visuelle des mots, le site même des lésions de l'alexie pure. Cette région de l'hémisphère gauche s'active à

l’identique, avec le même contour spatial et la même intensité, que les mots soient présentés à droite ou à gauche de la fovéa. Elle est la première à reconnaître qu’un mot est répété à l’identique, quelle que soit la position à laquelle il apparaît[77].

Pour réaliser cette invariance, la région de la forme visuelle des mots doit collecter les informations visuelles en provenance des deux moitiés du champ visuel. Elle doit donc recevoir des connexions des régions visuelles de l’hémisphère gauche, mais également des régions plus lointaines de l’hémisphère droit, qui jouent un rôle irremplaçable dans le traitement initial des mots présentés du côté gauche. Or la grande majorité des connexions entre les hémisphères, on le sait, transitent par la voie du corps calleux, un vaste faisceau qui regroupe des millions de fibres nerveuses. Ce raisonnement élémentaire conduit donc à une prédiction étrange : si une lésion vasculaire venait à interrompre le corps calleux, on devrait observer un trouble de la lecture restreint à la moitié gauche du champ visuel. Les mots présentés du côté gauche devraient contacter normalement les régions visuelles de l’hémisphère droit, mais ils devraient y rester confinés, incapables de rejoindre les aires du langage de l’hémisphère gauche. Le patient devrait donc les voir sans pouvoir les lire. Les mots présentés à droite, eux, devraient être lus normalement.

Cet étrange syndrome d’« hémi-alexie » existe bel et bien. Laurent Cohen et moi-même l’avons étudié chez deux patients atteints de lésions postérieures du corps calleux[78]. On voit sur la figure 2.11 l’activité cérébrale observée par IRM fonctionnelle chez l’un d’entre eux, monsieur A. C. Lorsque les mots s’affichaient sur la droite de l’écran, ce monsieur les lisait parfaitement. Par contre, lorsque les mots étaient présentés à gauche, il ne parvenait à les nommer qu’au prix d’une procédure longue et indirecte. Il affirmait qu’il ne voyait pas le mot lui-même, mais seulement une image qu’il parvenait à nommer en un temps bien plus long qu’une personne normale (près de deux secondes). De fait, l’IRM montra que les mots présentés à gauche n’activaient pas la région de la forme visuelle des mots. Par contre, ils entraînaient des activations préfrontales qui reflétaient probablement la recherche laborieuse du mot associé à l’« image » que voyait monsieur A. C.

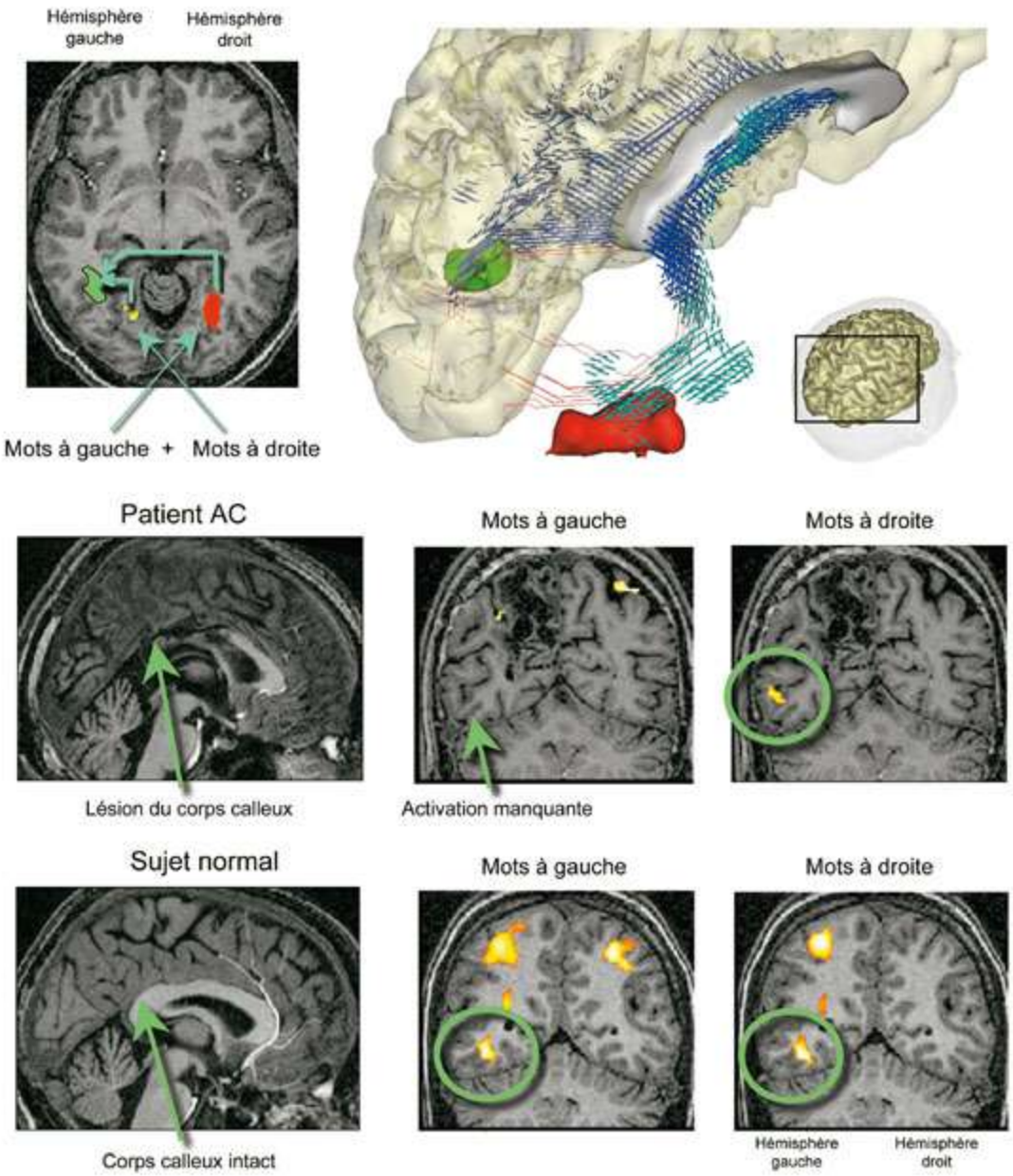


Figure 2.11 L'invariance visuelle repose en partie sur les connexions inter-hémisphériques du corps calleux. Lorsqu'un mot est présenté à gauche du point de fixation, il est d'abord traité par les aires visuelles de l'hémisphère droit et doit ensuite être transmis à la région de la forme visuelle des mots dans l'hémisphère gauche. Un vaste faisceau de fibres, rendu visible grâce à l'IRM de diffusion, relie ces régions (en haut à droite). Chez un patient atteint d'une lésion de la partie postérieure du corps calleux, cette transmission est interrompue, ce qui rend impossible la lecture des mots présentés du côté gauche (d'après Cohen et coll., 2000 et Molko et coll., 2002).

En bref, monsieur A. C. avait perdu une voie anatomique essentielle à la lecture, celle qui permet aux lettres qui entrent dans l'hémisphère droit de rejoindre l'hémisphère gauche *via* la porte d'entrée visuelle dans les aires du langage, la région occipito-temporale gauche. Si monsieur A. C.

parvenait encore à lire quelques mots présentés à gauche, c'est sans doute parce qu'il avait réappris à reconnaître, dans son hémisphère droit, les plus fréquents et les plus concrets d'entre eux. La partie antérieure intacte de son corps calleux lui permettait vraisemblablement de les transférer aux régions frontales gauches sous forme d'une image. L'examen de son histoire clinique montra qu'initialement, il ne parvenait pas du tout à lire les mots à gauche, comme l'immense majorité des patients atteints de lésions postérieures du corps calleux. Seul un lent réapprentissage lui avait permis d'inventer cette stratégie indirecte de passage par le sens.

L'épais réseau de connexions du corps calleux joue donc un rôle essentiel dans l'invariance spatiale de la lecture. Les lettres qui atterrissent à droite du point de fixation entrent dans l'hémisphère gauche et n'ont pas beaucoup de trajet à faire : elles contactent la région de la forme visuelle des mots très directement, par le biais de connexions courtes et internes à la région occipito-temporale gauche. Les lettres de gauche, par contre, contactent d'abord l'hémisphère droit et doivent ensuite être transférées *via* un laborieux parcours à travers le corps calleux. Sans doute cette trajectoire compliquée explique-t-elle, au moins en partie, le fait que la lecture, même chez un lecteur au cerveau intact, est plus lente et entachée d'erreurs lorsque les mots sont présentés du côté gauche que lorsqu'ils apparaissent du côté droit. La longueur plus grande du trajet et le débit moindre d'informations que le corps calleux est capable d'acheminer imposent un coût à la reconnaissance visuelle. Dans le cerveau humain, l'invariance pour la position n'est donc que partielle : toutes les zones de la rétine ne sont pas aussi efficaces pour reconnaître les mots, et nous ressemblons tous un peu à monsieur A. C. en ce que nous voyons mieux les mots du côté droit que du côté gauche[79].

À l'aide de l'imagerie cérébrale, nous avons pu visualiser très directement le faisceau de connexions lésé chez monsieur A. C. Une variante de l'IRM permet en effet de mesurer la direction des fibres dans le cerveau humain. Pour ce faire, on utilise une séquence d'IRM sensible à la diffusion spatiale des molécules d'eau. Contentons-nous de dire, pour simplifier, qu'on aimante deux fois les atomes de la même région en des sens opposés. Les atomes qui ne se déplacent pas génèrent des signaux qui s'annulent. Par contre, plus une région contient d'atomes d'hydrogène en déplacement, plus le signal d'IRM grandit. Or les molécules d'eau, qui

portent la majorité des atomes d'hydrogène, se déplacent constamment. L'IRM de diffusion permet de mesurer ce mouvement microscopique et aléatoire qu'on appelle « mouvement brownien ». Dans les tissus biologiques, ces mouvements des molécules de l'eau viennent buter sur les membranes des cellules. Par conséquent, si l'on effectue cette mesure dans la substance blanche, composée principalement de faisceaux de connexions nerveuses, on voit la diffusion de l'eau prendre la direction principale des fibres. L'IRM de diffusion permet ainsi de mesurer, en chaque point du cerveau, la direction des connexions les plus denses. En connectant entre eux ces petits vecteurs locaux, à l'aide d'un algorithme informatisé, on obtient une image tridimensionnelle des faisceaux de fibres, et l'on peut en déduire quelles régions sont connectées entre elles. Cette information est très nouvelle : même par dissection, suivre le tracé des connexions dans le cerveau humain demeure très difficile. Avant l'avènement de l'IRM, le seul atlas sérieux des connexions humaines datait de… Joseph-Jules Déjerine, un siècle auparavant !

L'IRM de diffusion de monsieur A. C., notre patient « hémi-alexique », a tout de suite montré une anomalie notable[80]. Toute la partie postérieure du corps calleux et une importante fraction de la substance blanche ne montraient pas d'anisotropie de la diffusion de l'eau, c'est-à-dire que le signal avait perdu la direction qu'il possède dans un cerveau normal. Les fibres calleuses atteintes par la lésion vasculaire avaient donc dégénéré, laissant les molécules d'eau libres de se mouvoir sans contrainte. Ce signal de diffusion anormal traçait, comme en négatif, les voies calleuses lésées et révélait leur cheminement dans les deux hémisphères, y compris dans des régions où le signal d'IRM standard semblait normal. En retraçant leur trajet dans un cerveau sain, nous avons pu reconstituer le faisceau que monsieur A. C. avait perdu (figure 2.11). Celui-ci s'étend effectivement depuis les régions visuelles occipitales droites jusqu'à la région ventrale gauche, en contournant la corne postérieure des ventricules et en traversant le corps calleux. Nous n'affirmons cependant pas que ce faisceau véhicule uniquement les informations visuelles sur les lettres et les mots – en fait, il est éminemment probable qu'un faisceau aussi volumineux transporte également beaucoup d'autres informations telles que la couleur, la forme ou l'identité des objets, que monsieur A. C. ne parvenait également pas à transférer entre ses deux hémisphères.

Tel est le pouvoir de l'imagerie cérébrale moderne : visualiser non seulement les plissements du cortex, mais également les régions activées et même les faisceaux qui les connectent. L'imagerie de diffusion joue aujourd'hui un rôle fondamental en neurologie clinique, où elle permet d'évaluer les accidents vasculaires et bien d'autres pathologies plus spécifiquement liées à la connectivité cérébrale, telles que la sclérose en plaques. Encore l'information obtenue par l'IRM de diffusion n'est-elle qu'anatomique : elle reflète la présence des connexions, mais pas leur état d'activité. Il n'est pas encore possible de mesurer l'utilisation préférentielle de tel ou tel faisceau au cours d'une activité mentale. Cependant, cette piste fait l'objet de recherches prometteuses, qui visent à exploiter les informations fonctionnelles disponibles dans le signal de diffusion[81]. Gageons que d'importantes avancées nous attendent encore dans ce domaine.

La reconnaissance subliminale des mots

Revenons à la lecture. Nous venons de voir que la région occipito-temporale gauche, qui s'active au cours de la lecture, rassemble les informations visuelles et nous permet de reconnaître les mots où qu'ils apparaissent sur la rétine. Mais l'invariance spatiale n'est qu'une des propriétés fondamentales que doit posséder la reconnaissance des caractères. Elle doit également s'affranchir de la forme précise des caractères. Tout bon lecteur sait non seulement reconnaître un « A » et un « a », mais également lire, sans guère de difficultés, des mots QuI MéLaNgEnT MaJuScUlEs Et MiNuScULeS. Comment l'invariance pour la casse est-elle implémentée dans notre cerveau ? Fait-elle appel aux mêmes régions que l'invariance de position ? A-t-elle lieu au même moment ou s'agit-il de deux opérations successives, étagées dans le temps et dans l'espace du cortex ?

Thad Polk et Martha Farah ont réalisé une expérience très simple[82] : ils ont mesuré l'activité cérébrale en IRM fonctionnelle tandis que les participants lisaient des mots mélangeant majuscules et minuscules, tels que « BaTeAu ». Ces stimuli, pourtant peu familiers, entraînaient pratiquement les mêmes activations que des mots normaux. En particulier, la région de la forme visuelle des mots répondait avec un profil normal d'intensité. Ainsi

les auteurs suggéraient-ils que cette région comprend une représentation abstraite des lettres et des mots, indépendante de la forme particulière des lettres.

Cependant, ces résultats sont-ils vraiment concluants ? La résolution spatiale modeste de l'imagerie ne permet pas d'affirmer que ce sont exactement les mêmes neurones qui répondent lorsque l'on voit les mots « BaTeAu », « bAtEaU », « BATEAU » et « bateau ». Il se pourrait que l'activation globale soit la même, et se situe au même endroit, sans pour autant que le problème d'invariance perceptive soit résolu dans cette région. Toute la difficulté consiste à montrer que les mêmes neurones, dans cette région, ont réellement reconnu deux fois le même mot, en dépit de variations superficielles de la forme des lettres.

Comme l'imagerie ne permet pas de voir les neurones individuels, ce problème peut paraître insoluble. Pourtant, une technique indirecte permet de l'aborder. C'est la méthode d'amorçage[83]. Son principe consiste à mesurer l'activité cérébrale en réponse à des paires de mots successifs. À chaque essai, on présente deux stimuli, l'un après l'autre, à un intervalle très bref. L'astuce consiste à comparer l'activité évoquée lorsque les deux stimuli représentent le même mot, éventuellement dans une police ou une casse différente (« bateau » suivi de « BATEAU »), et lorsqu'ils correspondent à des mots différents (« chalet » suivi de « BATEAU »). On sait, au travers d'expériences sur l'animal, que les neurones sont sensibles à la répétition. Leur taux de décharge diminue rapidement lorsque l'on répète plusieurs fois la même image, tandis qu'il remonte à un niveau élevé lorsqu'une image nouvelle est présentée. On s'attend donc à ce que le signal d'IRM suive le même profil et nous indique, indirectement, que les neurones de la région concernée ont repéré la répétition du même objet.

Il y a un dernier raffinement : il n'est pas nécessaire que les participants soient conscients de la répétition des mots. En fait, il vaut mieux qu'ils ne s'aperçoivent de rien. S'ils savent que les mots sont répétés, il est probable que leur attention change. La réduction du signal d'IRM causée par ce changement d'attention se propagerait alors à de multiples régions du cerveau, et l'on ne pourrait plus affirmer qu'elle reflète la détection locale d'une invariance perceptive – mais seulement l'inattention du sujet.

C'est pourquoi, au cours de mes expériences, le premier mot est toujours présenté très brièvement : 29 millièmes de seconde, soit moins que

la durée d'une image de cinéma. Nous voici dans les conditions de la perception subliminale. Pris en sandwich entre des formes géométriques aléatoires et sans signification, qui s'affichent exactement au même point sur l'écran, le mot devient totalement invisible. Le participant ne voit qu'un bref signal visuel clignotant, suivi du deuxième mot. On vérifie d'ailleurs qu'il n'est pas capable d'extraire la moindre information du mot masqué : lorsqu'on lui donne le choix entre deux mots possibles, qui n'ont pas une seule lettre en commun, il est incapable de reconnaître le mot caché et répond au hasard.

Quel est, dans ces conditions de présentation subliminale, l'impact de la répétition d'un mot sur le cerveau du lecteur ? Bien qu'invisible, le mot masqué influence la lecture. La région de la forme visuelle des mots réduit son activité lorsque le même mot est présenté deux fois de suite (figure 2.12). Crucialement, elle le fait aussi bien lorsque les mots sont présentés dans la même casse, par exemple « bateau » suivi de « bateau », que lorsque leur casse diffère, par exemple « BATEAU » suivi de « bateau ». Ce n'est pas le cas de toutes les régions du cerveau : les régions plus postérieures du lobe occipital, impliquées dans les processus visuels de plus bas niveau, ne réduisent leur activité que lorsque le même objet visuel est présenté à l'identique. Elles ne répondent qu'à la présence de traits élémentaires sur la rétine et le moindre changement est interprété comme un stimulus nouveau. Par opposition, la région de la forme visuelle des mots réalise une opération plus abstraite : elle est capable de reconnaître qu'un « a » et un « A » correspondent, à un niveau abstrait, au même stimulus. C'est donc bien à ce niveau qu'est résolu le problème de l'invariance visuelle au cours de la lecture[84].

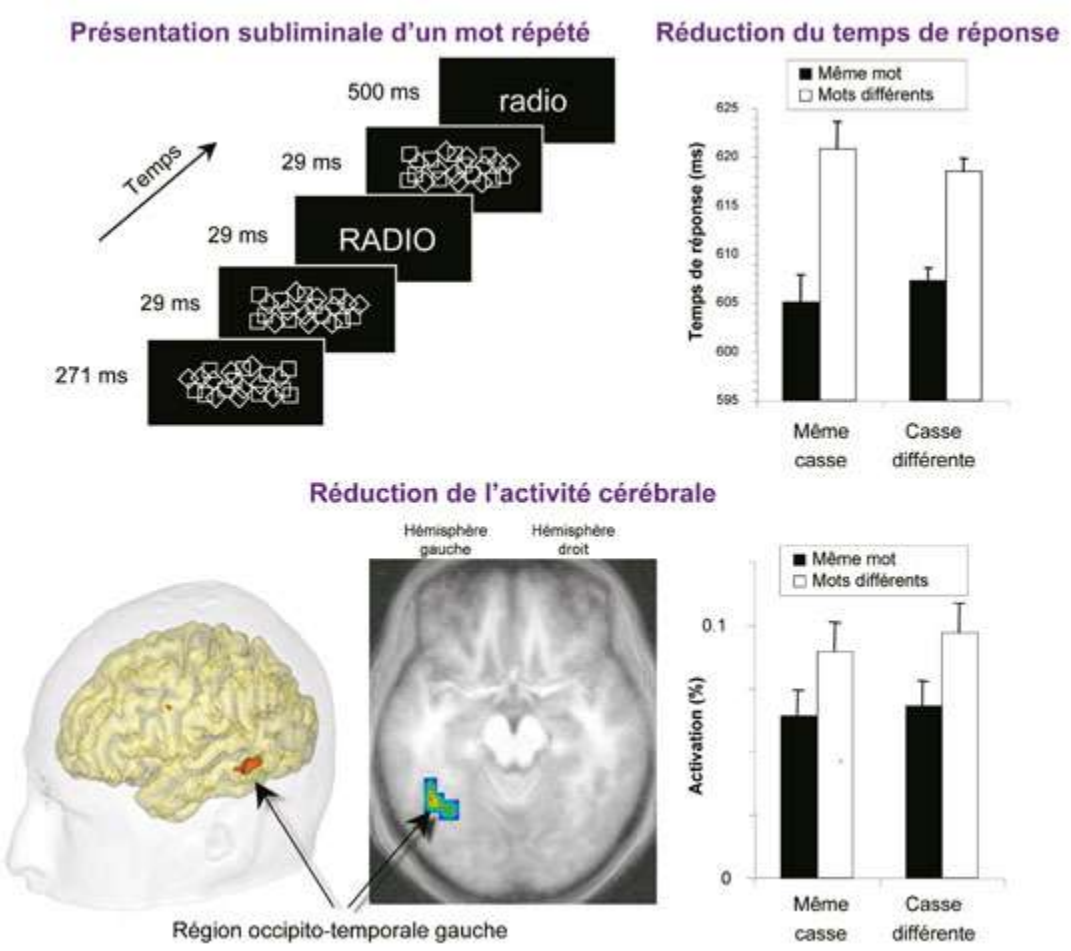


Figure 2.12 Les mots écrits peuvent être reconnus de façon non consciente ou « subliminale ». Dans cette expérience, un mot est présenté pendant 29 ms et pris en sandwich entre d'autres formes, ce qui le rend totalement invisible. Pourtant, ce mot non conscient accélère les réponses des participants lorsqu'il apparaît ensuite de façon consciente (diagramme en haut à droite). L'imagerie cérébrale montre que la région occipito-temporale gauche est responsable de cet effet d'amorçage : son activité diminue lorsque le même mot est répété, même si sa forme change radicalement lorsqu'il passe des majuscules aux minuscules (d'après Dehaene et coll., 2001).

Des expériences ultérieures ont permis de disséquer quelques étapes de la reconnaissance des lettres. Supposons que je vous présente le mot « TREFLE », suivi du mot « reflet ». De telles paires de mots constituent des anagrammes très particulières. Non seulement elles sont composées des mêmes lettres, mais on peut passer de l'un à l'autre en déplaçant une seule lettre de la première à la dernière position. Si je présente ces deux mots successivement, je peux même m'arranger pour que toutes les lettres communes « R », « E », « F », « L », et « E » soient présentées exactement au même point sur l'écran. Cette astuce permet donc de répéter les lettres, sans pour autant répéter les mots. Cela suffit-il à obtenir un effet

d’amorçage, ou faut-il répéter le mot tout entier ? Autrement dit, la région de la forme visuelle des mots s’intéresse-t-elle aux lettres ou aux mots entiers ? L’expérience montre qu’il existe, en fait, plusieurs niveaux successifs de codage qui constituent une hiérarchie d’invariance croissante[85]. En voici les principaux degrés.

Le plus bas niveau, celui du traitement des lettres, est observé dans la partie arrière de la région occipito-temporale, et ce dans les deux hémisphères. À ce niveau, seules sont codées les lettres isolées. Encore faut-il qu’elles soient répétées exactement au même endroit sur l’écran : si le même mot est présenté en le décalant d’une lettre vers la gauche, cette région ne montre plus aucun amorçage, ce qui signifie que ses neurones ne remarquent pas qu’il s’agit des mêmes lettres. Autrement dit, l’invariance de position n’existe pas encore à ce niveau. Pourtant, cette région est assez abstraite pour résister à un changement de majuscules en minuscules. On pense donc qu’elle contient une série de détecteurs abstraits de lettres, capables de repérer la présence de la lettre « A » en un point précis de la rétine, qu’elle soit écrite « A » ou « a ».

Un niveau plus avancé d’invariance perceptive est atteint dans la région immédiatement antérieure de l’hémisphère gauche, un centimètre plus en avant. Cette région repère la ressemblance entre des mots comme « TREFLE » et « reflet », même si leurs lettres ne sont pas parfaitement superposées. Autrement dit, cette région code pour les lettres ou les groupes de lettres – mais pas pour le mot entier –, et tolère un changement de position de ces lettres dans l’espace. Elle permet donc de repérer la ressemblance orthographique entre les mots, indépendamment de leur position. Comme l’ont récemment montré nos collègues d’Oxford, c’est vraisemblablement à ce niveau que sont reconnues les relations morphologiques entre les mots, c’est-à-dire la présence de racines communes à des mots comme « chasse » et « chasseur »[86]. À ce stade, ces racines ne reçoivent pas encore d’interprétation sémantique : le sens de ces mots n’est pas codé, mais seulement la présence d’une racine commune, de sorte que cette région trouverait la même racine dans « livre » et « délivrer ». À ce point du traitement de l’information, le système visuel juge simplement utile de décomposer les mots en une arborescence structurée de lettres, graphèmes, syllabes et morphèmes.

Encore un centimètre plus en avant dans la région temporale gauche, on voit apparaître un codage visuel plus sélectif : l'amorçage survient avec plus de force quand le mot est répété (« REFLET » suivi de « reflet ») que quand seules ses lettres le sont, mais composent un autre mot (« TREFLE » suivi de « reflet »). À ce niveau, c'est donc la chaîne de caractères tout entière qui est codée ou, au minimum, de grosses suites de lettres telles que « flet ».

Ces expériences sont frappantes dans la mesure où elles dévoilent toute la complexité de traitement des mots écrits. La hiérarchie de reconnaissance visuelle demeure insoupçonnée du lecteur qui, naïvement, a l'impression d'avoir un accès direct aux mots écrits. N'oubliez pas que toute cette activité cérébrale survient alors que les participants n'ont aucune conscience d'avoir vu des mots ou des lettres répétés. Ainsi les stimuli subliminaux peuvent-ils faire l'objet d'un « liage » inconscient – les lettres ne restent pas détachées les uns des autres, mais forment des combinaisons stables qui distinguent des anagrammes telles que « humer » et « rhume ». En définitive, c'est l'ensemble des opérations de reconnaissance visuelle, depuis le traitement rétinien jusqu'aux plus hauts niveaux d'abstraction et d'invariance, qui est susceptible de se dérouler automatiquement, en moins d'un cinquième de seconde, et en dehors de tout contrôle conscient[87].

L'imprégnation culturelle du cortex

Un esprit critique pourrait, à bon droit, objecter que ces opérations visuelles n'ont peut-être rien de propre à la lecture. Lorsque notre cerveau reconnaît la similarité entre les mots « RADIO » et « radio », peut-être ne fait-il que normaliser la taille des lettres. Il se pourrait qu'il identifie les formes « O » et « o » tout comme il reconnaît une fourchette vue de loin ou de près, quels que soient sa taille et son angle de vue. Quelles preuves avons-nous que les opérations qu'effectue la région occipito-temporale gauche sont propres à la lecture ?

En fait, l'invariance entre majuscules et minuscules constitue, en soit, une preuve de l'adaptation du système visuel à la lecture. Nous sommes tellement habitués à associer les lettres minuscules et majuscules que nous ne prêtons plus attention à l'arbitraire de leur forme. Certaines lettres se ressemblent en minuscules et en majuscules (« o » et « O », « u » et « U »),

mais d'autres semblent appariées au hasard. Rien ne prédestine la forme « a » à représenter la même lettre que la forme « A » : on pourrait imaginer un alphabet ou « e » serait la minuscule de « A », et « g » la minuscule de « R ». L'association minuscules-majuscules est une convention arbitraire à laquelle nous nous adaptons lorsque nous apprenons à lire.

Quelles régions cérébrales sont impliquées dans cette forme d'invariance d'origine culturelle ? L'une de mes expériences d'imagerie cérébrale a montré très clairement que c'est, une fois de plus, la région occipito-temporale gauche qui a internalisé cette convention[88]. Cette expérience m'a demandé un petit jeu littéraire dans le style de Georges Perec. J'ai constitué deux listes de mots français. Dans la première liste, les mots s'écrivent exclusivement avec des lettres dont les minuscules et les majuscules ont la même forme, à un changement de taille près : COUP-coup, FOC-foc, SOUK-souk, VOUS-vous… Dans l'autre liste de mots, les lettres minuscules n'ont aucune ressemblance avec les majuscules, et relèvent donc d'une convention culturelle : RAGE-rage, TARE-tare, ATRE-âtre, ERG-erg… Introspectivement, nous n'éprouvons aucune difficulté à reconnaître qu'il s'agit des mêmes mots. C'est seulement en y regardant de plus près que nous reconnaissons l'exploit réalisé par notre système visuel, puisque « ERG » et « erg » n'ont pas du tout la même forme. Quelle région cérébrale « sait » qu'il s'agit du même mot ?

Les résultats ont conforté le rôle central de la région occipito-temporale gauche dans la lecture. C'est elle qui, une fois de plus, montre une réduction d'activation lorsque les mots sont répétés – sans faire la moindre différence entre les mots qui font l'objet d'une convention culturelle et ceux dont les lettres ne font que changer de taille (figure 2.13). Pour cette région, un « G » et un « g » sont aussi semblables qu'un « O » et un « o » – preuve que cette région s'est adaptée aux conventions de notre alphabet.

On peut en inférer qu'il doit exister, dans cette région, des neurones qui répondent de façon identique à « G » et « g ». Leur réponse ne saurait être due au hasard ou à l'organisation innée du système visuel. Elle résulte nécessairement d'un apprentissage qui y a incorporé des associations culturelles nouvelles. Pour bien comprendre ce que cet apprentissage a de particulier, nous pouvons contraster cette région gauche avec son homologue de l'hémisphère droit. Mes résultats ont montré que l'hémisphère droit reconnaissait la similarité entre des mots qui se

ressemblent, comme « SOUK » et « souk », mais pas entre « ERG » et « erg ». Autrement dit, chez la majorité des droitiers, l'hémisphère droit paraît appliquer aux lettres des stratégies de reconnaissance universelles, capables seulement d'extraire l'invariance de taille et de position. Seule la région visuelle gauche semble avoir incorporé les conventions culturelles uniques à la lecture.

Nous disposons d'autres preuves de la spécialisation de cette région. Grâce à l'imagerie fonctionnelle, nous avons montré qu'elle ne se contente pas de répondre passivement, dès la naissance, à n'importe quel objet qui aurait une forme proche de celle d'une lettre ou d'un mot, mais qu'elle s'adapte activement à la lecture. En effet, il ne suffit pas de présenter n'importe quelle chaîne de caractères pour l'activer. Chez les Français, par exemple, la région répond beaucoup plus fortement aux chaînes de caractères qui forment un mot réel ou plausible comme « MOUTON » ou « BLAUNE », qu'aux chaînes qui violent la structure de leur langue, par exemple des chaînes de consonnes telles que « QFSFZG » (figure 2.14)[89]. Elle répond également mieux aux chaînes de lettres qu'aux séries de chiffres telles que « 52314 »[90]. Souvenez-vous que monsieur C., le patient de Déjerine, savait encore lire les chiffres mais pas les lettres. De toute évidence, seules les chaînes régulières de lettres sont traitées par cette région.

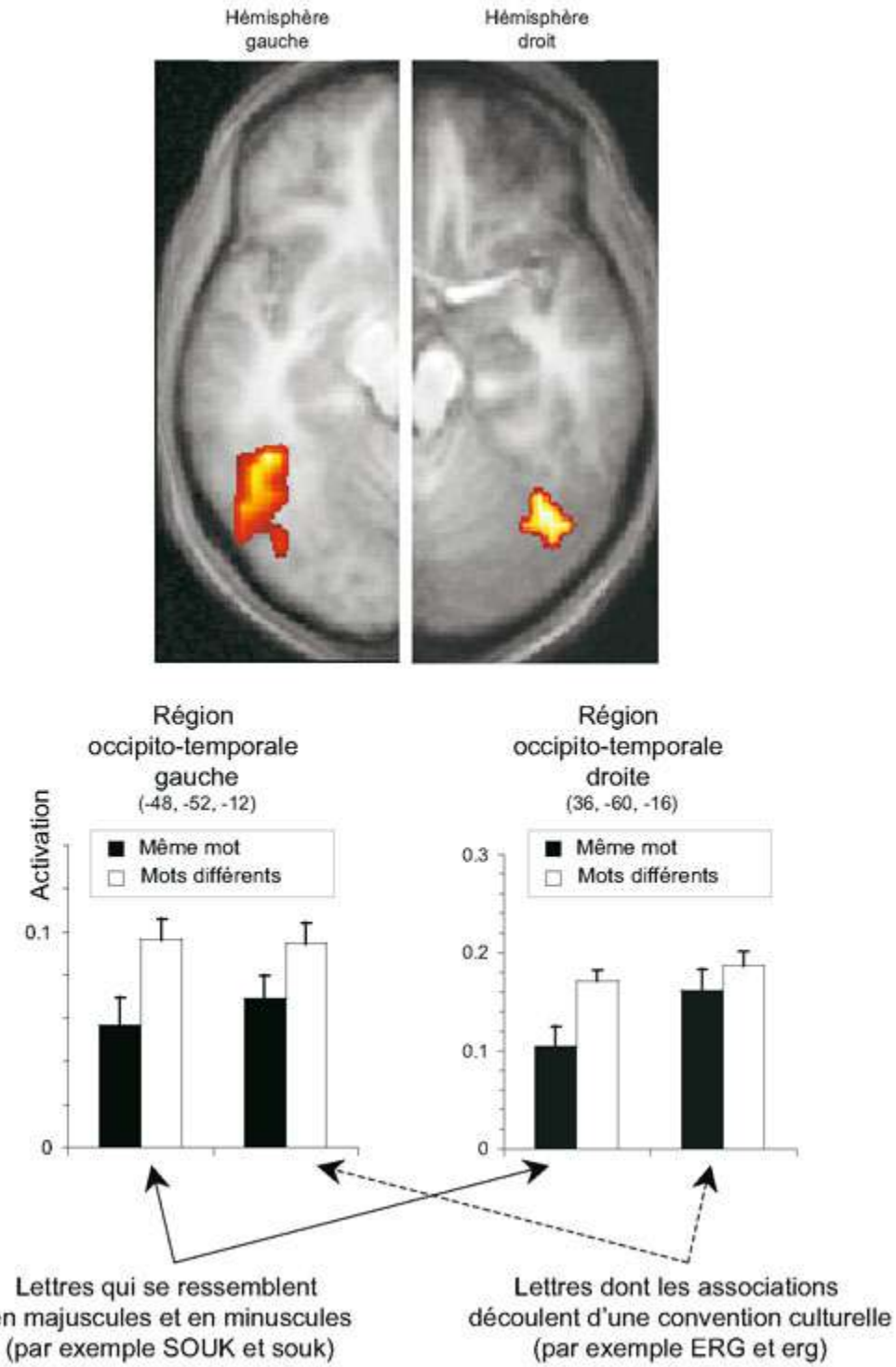
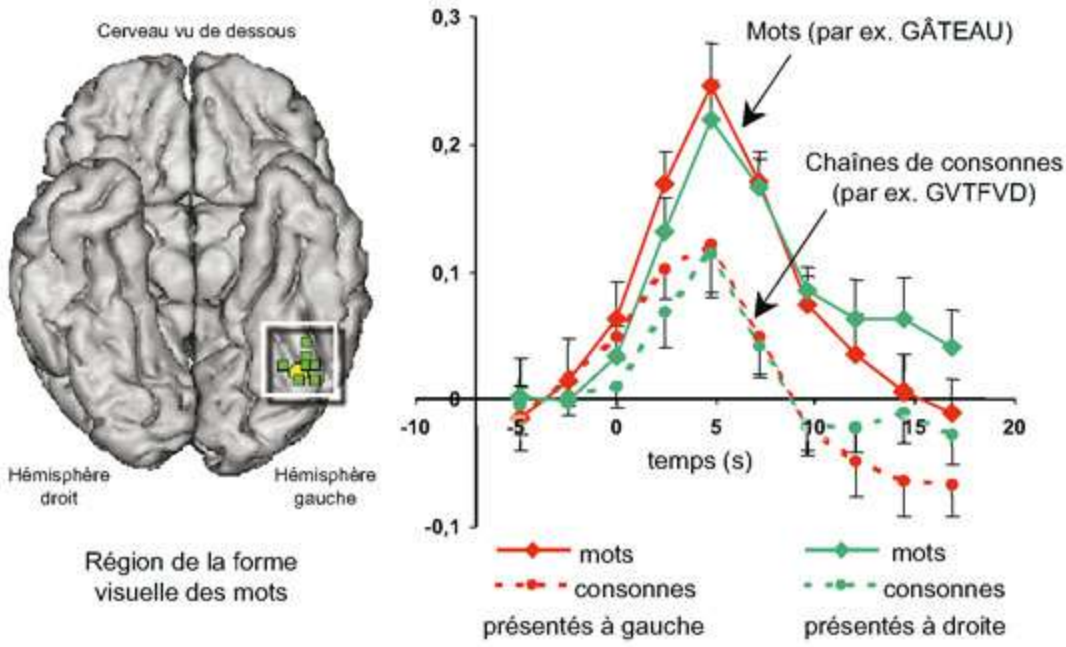


Figure 2.13 La région occipito-temporale gauche a incorporé les conventions culturelles de la lecture. Elle diminue d'activité lorsqu'on présente deux fois le même mot, ce qui signifie qu'elle reconnaît ce mot même lorsqu'il passe des minuscules aux majuscules. Crucialement, elle continue de reconnaître les mots même si leurs minuscules et leurs majuscules, telles les lettres « e » et « E », ne se ressemblent pas et ne sont associées que par une pure convention. La région droite, au contraire, semble ne répondre qu'à la ressemblance visuelle des lettres, pas aux conventions culturelles (d'après Dehaene et coll., 2004).

L’enregistrement des potentiels évoqués permet de chronométrer ces divergences : c’est entre 150 et 190 millisecondes après l’apparition du stimulus que la région occipito-temporale gauche révèle, pour la première fois, sa préférence pour les chaînes de lettres bien formées par rapport aux suites de consonnes ou de chiffres[91]. Or, sur le plan strictement visuel, tous ces stimuli ne sont guère différents. On peut même aller plus loin : la forme des caractères étant totalement arbitraire, on peut imaginer un autre système d’écriture dans lequel 52314 ou QFSFZG auraient été des mots, tandis que MOUTON aurait été une chaîne dépourvue de sens ! La réponse de notre région n’est donc pas uniquement déterminée par le stimulus visuel, mais par nos histoires culturelles respectives. Chaque personne, en apprenant à lire, acquiert des détecteurs neuronaux ajustés à la langue qu’elle maîtrise.



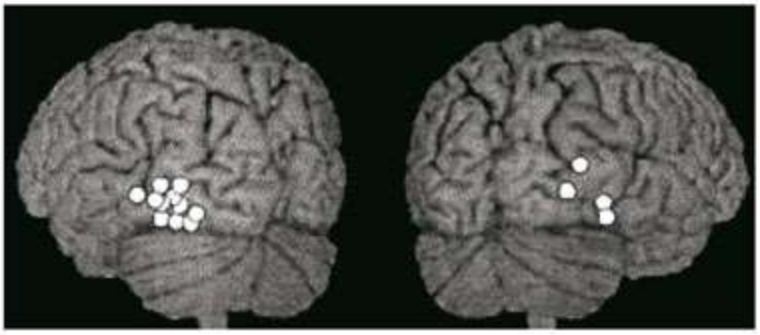


Figure 2.14 La région occipito-temporale gauche a appris les régularités de l'orthographe. L'IRM fonctionnelle (en haut, d'après Cohen et coll., 2002) montre qu'elle répond mieux aux vrais mots qu'à des chaînes de consonnes qui ne respectent pas les règles orthographiques du français – et ce, quel que soit le côté de présentation. Une autre technique, la magnéto-encéphalographie (en bas), révèle que cette réponse préférentielle pour les mots survient environ 150 ms après leur apparition sur la rétine (d'après Tarkiainen et coll., 1999).

Lire le chinois

Qu'en est-il dans d'autres systèmes d'écriture ? Leur variété est telle que l'on pourrait s'attendre à une extraordinaire diversité d'activations cérébrales. Or il n'en est rien. Dans toutes les cultures, en dépit de formes de surface variées, les mots écrits s'inscrivent toujours dans la même région cérébrale, la région occipito-temporale gauche, avec seulement de minimes différences liées à la forme et à la structure interne des caractères.

Selon d'anciennes spéculations neuropsychologiques, en chinois, la reconnaissance des caractères serait plus globale que la lecture de l'alphabet. En conséquence, la lecture du mandarin solliciterait davantage l'hémisphère droit, réputé « holistique », tandis que la lecture des écritures alphabétiques impliquerait plus l'hémisphère gauche. En somme, les différences culturelles se traduiraient par d'importants changements des circuits cérébraux de la lecture.

Aujourd'hui l'imagerie cérébrale a clairement démontré qu'il n'en est rien : la lecture en chinois active la région occipito-temporale ventrale, avec une latéralisation significative en faveur de la gauche[92]. Il est stupéfiant de constater qu'à plusieurs milliers de kilomètres de distance, en dépit de différences de méthodologie, de recrutement, de morphologie de la boîte crânienne, d'éducation et de système d'écriture, les coordonnées de la région activée en chinois peuvent se situer à quelques millimètres de distance seulement de celles observées chez un sujet francophone qui lit des mots imprimés en caractères latins.

L'analyse de sujets qui lisent plusieurs écritures permet d'examiner, au sein du même cerveau, l'universalité des mécanismes de représentation des mots écrits. En chinois, depuis les années 1970, existe un système officiel de transcription des mots dans l'alphabet latin. Ce système nommé *pinyin* – mot qui signifie « assemblage des sons » – fait appel aux 26 lettres de notre alphabet latin, souvent regroupées en graphèmes tels que « zh », « ch », ou « ang ». Le mot « banque », par exemple, se transcrit *yínháng*. Beaucoup d'enfants chinois apprennent le *pinyin* avant de commencer le long

apprentissage des caractères. Ainsi, les jeunes générations sont-elles souvent bilingues ou plutôt « bigrammes ». En effet, elles disposent de deux voies d'accès écrit à la même langue orale. Or l'imagerie cérébrale montre que les régions activées par ces deux systèmes d'écriture se recouvrent étroitement dans la région occipito-temporale gauche[93].

Non seulement c'est la même région du cerveau qui est sollicitée pour la lecture du chinois et de l'alphabet, mais de plus elle montre les mêmes propriétés fonctionnelles chez les locuteurs du chinois que chez les lecteurs d'écritures alphabétiques. En chinois aussi, la région occipito-temporale gauche préfère les vrais caractères aux formes qui leur ressemblent mais n'ont pas de sens[94]. Cette propriété – analogue direct de la préférence pour les mots par rapport aux chaînes de consonnes – implique que la région s'est adaptée aux contraintes de l'écriture chinoise. Chez le lecteur chinois, il est probable qu'elle comprenne aussi une hiérarchie de détecteurs capables de répondre aux marqueurs sémantiques et phonétiques qui composent les caractères.

En conséquence, l'idée d'une reconnaissance « holistique » des caractères chinois apparaît fausse. L'amorçage fournit, une fois de plus, la preuve que le système visuel des lecteurs chinois décompose les caractères en fragments organisés de façon hiérarchique. La présentation subliminale de fragments des caractères donne lieu à des phénomènes d'amorçage comparables à ceux que l'on obtient en écriture alphabétique lorsque l'on précède un mot par l'un de ses morphèmes (« chasse » suivi de « chasseur »)[95].

Les deux lectures du japonais

Avec un collègue de Tokyo, Kimihiro Nakamura, j'ai également étudié l'universalité de la lecture en me penchant sur le cas bien particulier du japonais[96].

Ouvrez un journal japonais et vous y découvrirez un étonnant mélange d'écritures (figure 2.15). De nombreux caractères sont en notation kanji, un vaste jeu d'au moins 3 000 caractères empruntés au chinois et qui représentent les mots. Cependant, d'autres caractères sont écrits en notation kana, un répertoire de 46 caractères qui représentent les syllabes et permettent de transcrire la prononciation de n'importe quel mot,

particulièrement les emprunts étrangers. De nombreux noms peuvent s'écrire aussi bien en kanji qu'en kana. Toutefois, les caractères kana servent fréquemment à noter les mots grammaticaux et les inflexions grammaticales des verbes, des adjectifs et des adverbes. Il n'est donc pas rare qu'un même verbe soit écrit à l'aide d'un mélange de caractères kanji et kana.

En dépit de ces différences, mes recherches ont montré que la reconnaissance visuelle des kanji et des kana sollicite, une fois de plus, la région occipito-temporale ventrale (figure 2.14). Dans les deux cas, l'activation est latéralisée à gauche, et son pic se situe pratiquement au même point que chez les sujets français ou anglais qui lisent une écriture alphabétique. D'ailleurs, la lésion de cette région chez les patients japonais cause fréquemment une alexie pure, aussi bien en kanji qu'en kana[97].

Il existe toutefois quelques différences entre les circuits cérébraux sollicités par ces notations, bien qu'elles soient fort modestes. La lecture des mots écrits en kana active un peu plus les régions visuelles précoces du pôle occipital, peut-être parce qu'ils comprennent plus de caractères et s'étendent un peu plus loin sur la rétine. La lecture des mots écrits en kanji, quant à elle, entraîne un peu plus d'activité dans la région visuelle ventrale des deux hémisphères, en direction de la ligne médiane du cerveau.

D'autres études d'imagerie et de neuropsychologie confirment que les réseaux respectifs de la lecture en kanji et en kana ne sont pas exactement identiques. Il arrive – rarement – qu'un patient atteint d'une lésion cérébrale sache encore lire dans l'une de ces notations, mais pas dans l'autre[98]. Il est donc probable qu'à l'intérieur de la même région générale, les différentes notations fassent appel à des microterritoires corticaux distincts que nous ne pouvons pas, pour l'instant, séparer avec la résolution actuelle de l'IRM.

À une échelle plus grossière, cependant, transparaît l'universalité des bases cérébrales de la lecture. Dans toutes les cultures, une seule région cérébrale, la région occipito-temporale gauche, apprend à reconnaître la forme visuelle des mots, en adaptant son architecture hiérarchique aux problèmes spécifiques que pose chaque notation.

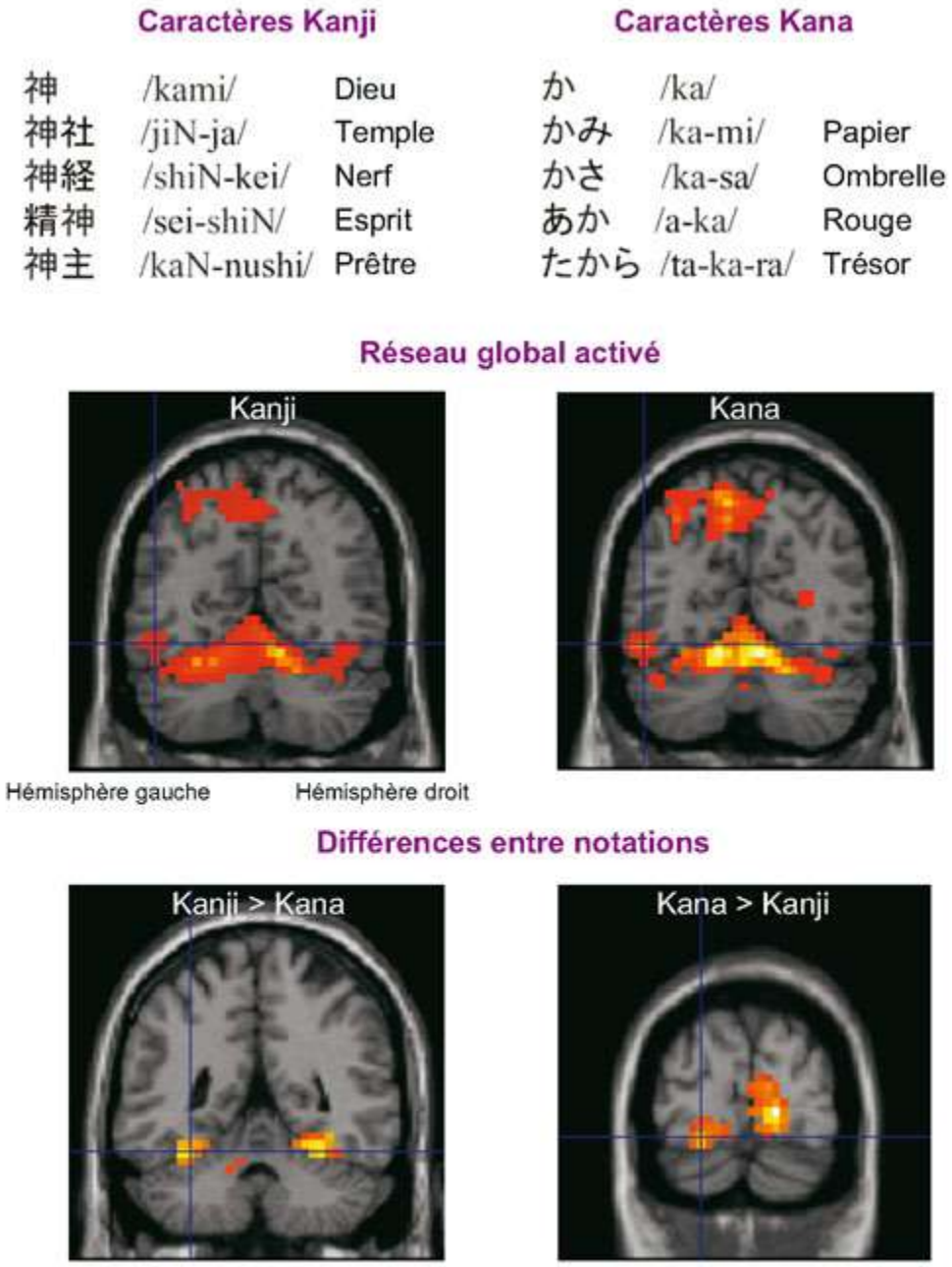


Figure 2.15 La même région occipito-temporale gauche sert à la lecture du japonais et du français. L'écriture japonaise fait appel à deux systèmes radicalement différents : les kanji, un jeu d'au moins 3 000 caractères qui représentent les sens des mots (colonne de gauche), et les kana, 46 symboles qui représentent la prononciation des syllabes (colonne de droite). En dépit de ces différences, ces notations font toutes appel à la région occipito-temporale ventrale gauche, à une position virtuellement identique à celle des sujets français. Tout au plus les kanji font-ils un peu plus appel aux régions visuelles ventrales des deux hémisphères, tandis que les kana causent un peu plus d'activation du pôle occipital (d'après Nakamura et coll., 2005).

Au-delà de la forme visuelle du mot

Nous venons de voir qu'une région bien délimitée, la région occipito-temporale gauche, joue un rôle déterminant et universel dans la reconnaissance des mots écrits. Mais que se passe-t-il après cette étape ? Comment accédons-nous au sens et à la sonorité des mots ? Après la reconnaissance visuelle, par où chemine la lecture ?

L'anatomie cérébrale clarifie les voies de projection qui propagent l'activation cérébrale au-delà des aires visuelles. Grâce à l'IRM de diffusion, nous commençons à visualiser les grands faisceaux de fibres qui, chez l'homme, relient les régions du cortex. Ainsi, le faisceau longitudinal inférieur, qui parcourt le lobe temporal depuis la région occipitale la plus postérieure jusqu'au pôle antérieur, vient-il d'être cartographié (figure 2.16)[99]. Son anatomie suggère qu'il collecte les informations de différentes régions postérieures, dont la région occipito-temporale impliquée dans la reconnaissance des mots, et les envoie très en avant dans le lobe temporal. En parallèle à cette autoroute majeure de l'information corticale, d'autres réseaux de fibres « en U » connectent également les régions temporales de proche en proche. Dans la mesure où toutes ces fibres sont gainées de myéline, leur vitesse de conduction doit être rapide. L'information sur l'identité des mots peut ainsi être acheminée très vite à l'ensemble du lobe temporal.

Toutefois, l'IRM ne voit que les faisceaux les plus importants du cerveau. De nombreuses connexions, moins regroupées en gros câbles, mais tout aussi importantes sur le plan fonctionnel, lui échappent encore. Une étude anatomique *post mortem* a ainsi montré que, chez l'homme, les neurones du cortex temporal inférieur établissaient des connexions étonnamment distantes et bien plus dispersées que ne le laissait penser la recherche chez les autres primates[100]. Pour visualiser ces axones épars, qui sont trop petits pour être visibles en IRM, les chercheurs ont dû attendre des circonstances très particulières. Un de leurs patients a été victime d'un accident vasculaire dans la région occipito-temporale droite, puis est décédé trois semaines plus tard d'une tout autre maladie, en léguant son cerveau à la recherche. Celui-ci fut traité avec un réactif qui se fixe sur toutes les terminaisons nerveuses récemment mortes, révélant ainsi toutes les projections nerveuses directement issues de la région lésée trois semaines plus tôt. Les résultats de cet examen furent édifiants : la région occipito-temporale droite envoie de multiples projections vers pratiquement *toutes*

les aires corticales associatives, particulièrement les aires du langage. Non seulement ces connexions courent sur près d'une dizaine de centimètres à travers le corps calleux pour rejoindre l'autre hémisphère du cerveau, mais elles s'y dispersent ensuite en éventail. Leur densité atteint un pic dans les régions du langage, en particulier l'aire de Broca (cortex frontal inférieur) et l'aire de Wernicke (partie postérieure du cortex temporal supérieur). Par symétrie, on peut supposer que l'aire de la reconnaissance visuelle des mots envoie tout autant de projections vers les régions corticales des deux hémisphères.

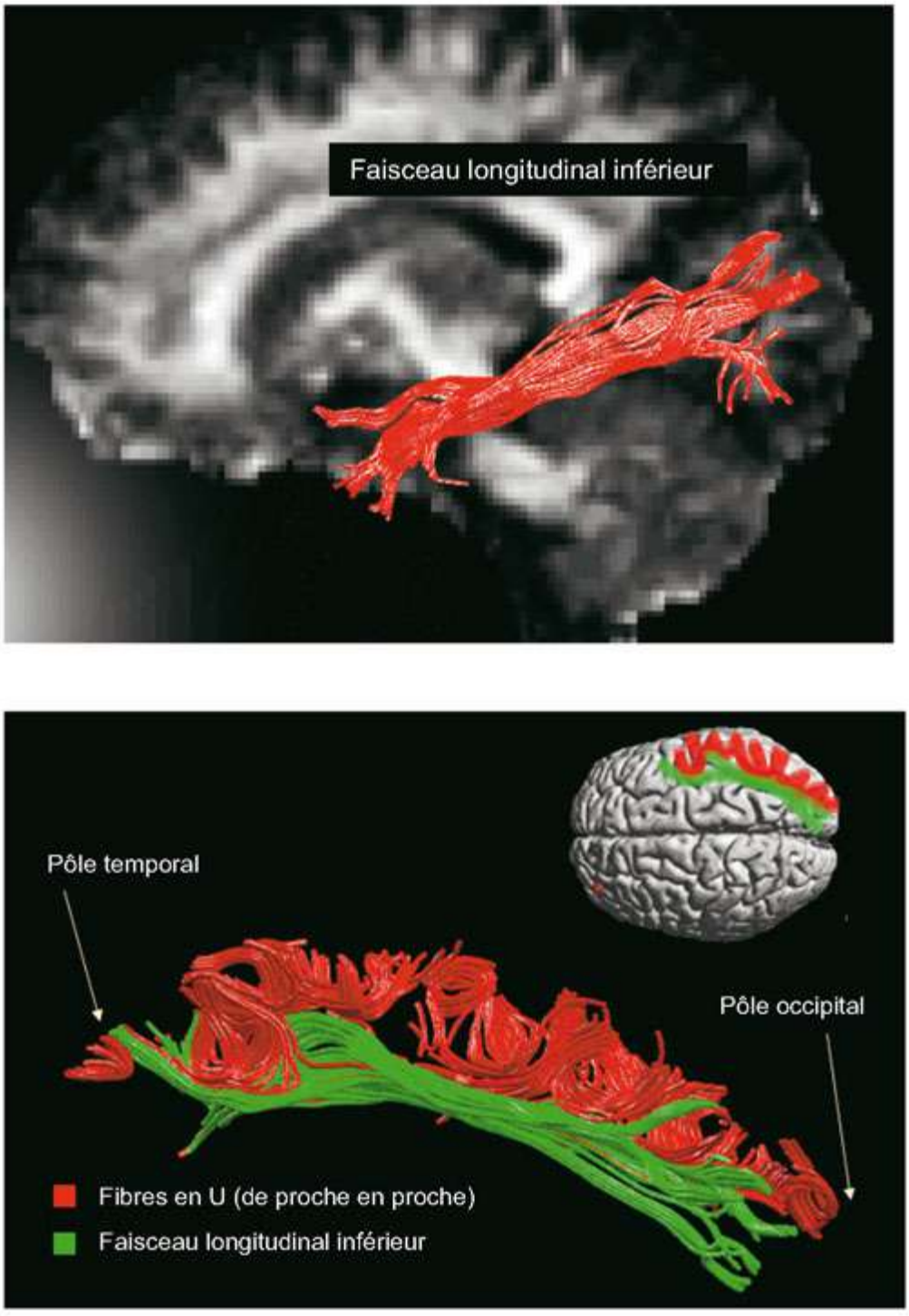


Figure 2.16 La région occipito-temporale gauche, située en arrière du cerveau, analyse les mots écrits et les transmet aux aires du langage par le biais de vastes faisceaux de connexions, que l'on commence à visualiser par IRM de diffusion. On voit ici la reconstruction d'une grande voie anatomique, le faisceau longitudinal inférieur, qui projette vers l'avant du lobe temporal. De nombreuses fibres en U projettent également de proche en proche tout le long de la surface corticale (d'après Catani et coll., 2003).

Cette étude anatomique suggère donc que la région occipito-temporale agit comme un aiguillage essentiel. Elle distribue très largement l'information sur l'identité des objets et des mots, et l'envoie simultanément à de nombreuses régions corticales. Mais comment vérifier que ces connexions sont bien fonctionnelles ? Peut-on suivre en direct, milliseconde par milliseconde, la transmission de l'identité des mots au reste du cortex ? Voir, tout simplement, l'ensemble du cheminement d'un mot écrit depuis l'aire visuelle primaire jusqu'aux régions qui codent pour le son et le sens ? Tel est le tour de force qu'ont réussi Ksenija Marinkovic, Anders Dale, Eric Halgren et leurs collègues de Boston[101].

Grâce à une machine moderne de magnéto-encéphalographie, ils ont mesuré les minuscules champs magnétiques engendrés à la surface de la tête lorsque les réseaux corticaux de la lecture entrent en activité. Ils ont également conçu un nouvel algorithme capable de tirer de ces enregistrements un film des régions corticales activées. Ainsi ont-ils visualisé le décours de l'activité cérébrale alors qu'une personne lit un mot (figure 2.17). Bien qu'il s'agisse encore d'un modèle, à prendre avec précaution, jamais on n'avait obtenu auparavant d'images aussi réalistes du cheminement cérébral des mots.

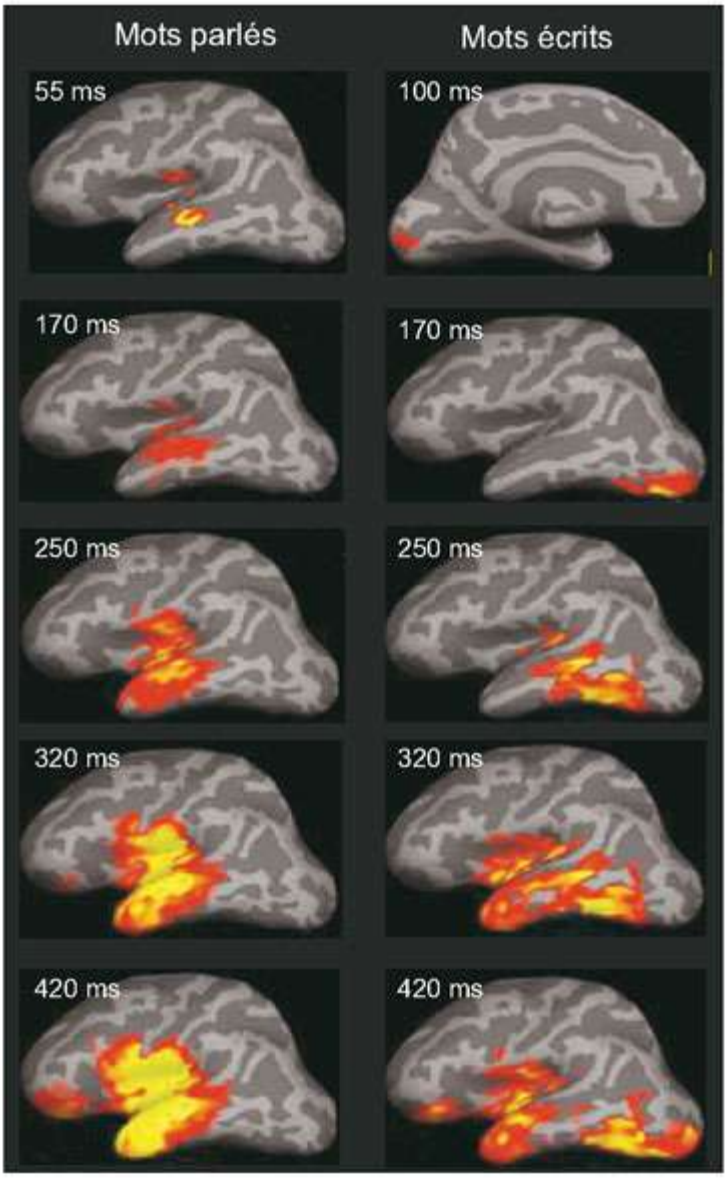


Figure 2.17 Selon qu'on entende ou qu'on lise un mot, les voies d'entrées dans le cortex diffèrent, mais l'activité converge ensuite vers les mêmes aires du langage. Chaque image représente un instantané de l'activité cérébrale à la surface du cortex, pris à un moment différent après l'apparition du mot. Seul l'hémisphère gauche est représenté. Durant la lecture, l'activation débute dans le pôle occipital, vers 100 millisecondes, puis vers 170 millisecondes elle s'étend à la région occipito-temporale gauche, siège présumé de l'analyse de la forme visuelle du mot. Survient ensuite une explosion d'activité dans de multiples régions temporales et frontales partagées avec l'audition des mots (d'après Marinkovic et coll., 2003).

La lecture débute dans le pôle occipital, siège des représentations visuelles précoces. Vers 170 millisecondes, l'activation bascule en faveur de l'hémisphère gauche, où elle demeure restreinte à la région occipito-temporale ventrale. Puis, c'est l'explosion : vers 250 millisecondes, l'activité envahit une vaste portion des deux lobes temporaux, dans ses

régions supérieure, moyenne et inférieure. Vers 300 millisecondes, elle étend son emprise au sein de l'hémisphère gauche, y compris le pôle temporal, l'insula antérieure et la région de Broca. On voit ensuite cette activité se prolonger pendant plusieurs centaines de millisecondes, avec l'invasion de nouvelles régions frontales et un curieux retour vers les régions visuelles postérieures.

Ce qu'il faut bien comprendre, c'est que, moins d'un quart de seconde après l'apparition du mot sur la rétine, les régions activées n'ont plus rien de spécifique à la lecture. Toutes s'activent aussi bien lorsque nous lisons que lorsque nous entendons des mots parlés. Ainsi, la région occipito-temporale apparaît comme la dernière à être impliquée dans les étapes strictement visuelles de la lecture. Tout ce qui suit participe à la mise en liaison du mot écrit avec des représentations du son et du sens qui ne sont pas propres à la lecture, mais sont également utilisées pour la production et la compréhension de la parole.

Les réseaux du son et du sens

Souvenez-vous que les psychologues postulent deux voies de lecture :

— les mots réguliers et les néologismes sont reconnus par une voie de traduction des lettres en sons (conversion graphème-phonème) ;

— les mots fréquents ou irréguliers sont identifiés dans un lexique mental qui donne accès à l'identité et au sens des mots.

Peut-on séparer ces deux circuits dans le cerveau ? Correspondent-ils à deux réseaux bien distincts d'aires cérébrales ? Toute une série de travaux d'imagerie cérébrale a utilisé le modèle des deux voies de la lecture afin d'effectuer un premier tri entre les régions cérébrales du son et du sens.

Une méthode simple consiste à examiner l'activité cérébrale tandis qu'une personne lit différents types de mots. C'est la méthode « à stimulus variable et à tâche constante ». On pourra, par exemple, comparer l'activité cérébrale évoquée par de vrais mots comme « cheval » ou « voiture », avec celle évoquée par des pseudo-mots tels que « cheture » ou « voival »[102]. Toute différence en faveur des mots révélera les régions impliquées dans le lexique mental et la récupération du sens des mots. La différence inverse – plus d'activité pour les pseudo-mots – révélera les réseaux impliqués dans la conversion graphème-phonème.

Des expériences plus subtiles permettront de préciser si les deux routes fonctionnent bien comme le prédisent les études de psychologie expérimentale. La fréquence des mots module-t-elle l'activité cérébrale ? Selon le modèle, les mots fréquents sont stockés dans le lexique, mais les mots très rares comme « astrolabe » ou « calice » doivent être souvent traités comme des pseudo-mots. Existe-t-il également des différences entre mots à la prononciation régulière, comme « canari », et irrégulière, comme « femme » ou « oignon » ? Les premiers peuvent passer par la voie de conversion graphème-phonème, tandis que les seconds ne peuvent être lus correctement que dans la mesure où ils sont d'abord identifiés en tant que mots au sein du lexique.

Une seconde méthode, complémentaire de la précédente, consiste à présenter les mêmes listes de mots, mais à faire varier la tâche que l'on demande aux participants d'exécuter (méthode « à stimulus constant et à tâche variable[103] »). Dans un bloc d'essais, on pourra, par exemple, demander aux participants de juger si les mots présentés riment ou pas. Cette tâche phonologique devrait activer la voie de conversion graphème-phonème. Au cours d'un autre bloc, on demandera au sujet d'évaluer si ces mots sont synonymes ou pas – une tâche sémantique qui requiert l'accès au lexique mental et l'attention au sens. Enfin, on pourra concevoir une tâche orthographique, où il s'agira par exemple de juger si deux mots se terminent par les mêmes lettres, quelle qu'en soit la prononciation (par exemple « mairie » et « joie »). Dans tous les cas, c'est l'attention du sujet, focalisée sur tel ou tel niveau de traitement des mots, qui amplifiera l'activité cérébrale et créera une différence détectable alors que le stimulus, lui, ne change pas.

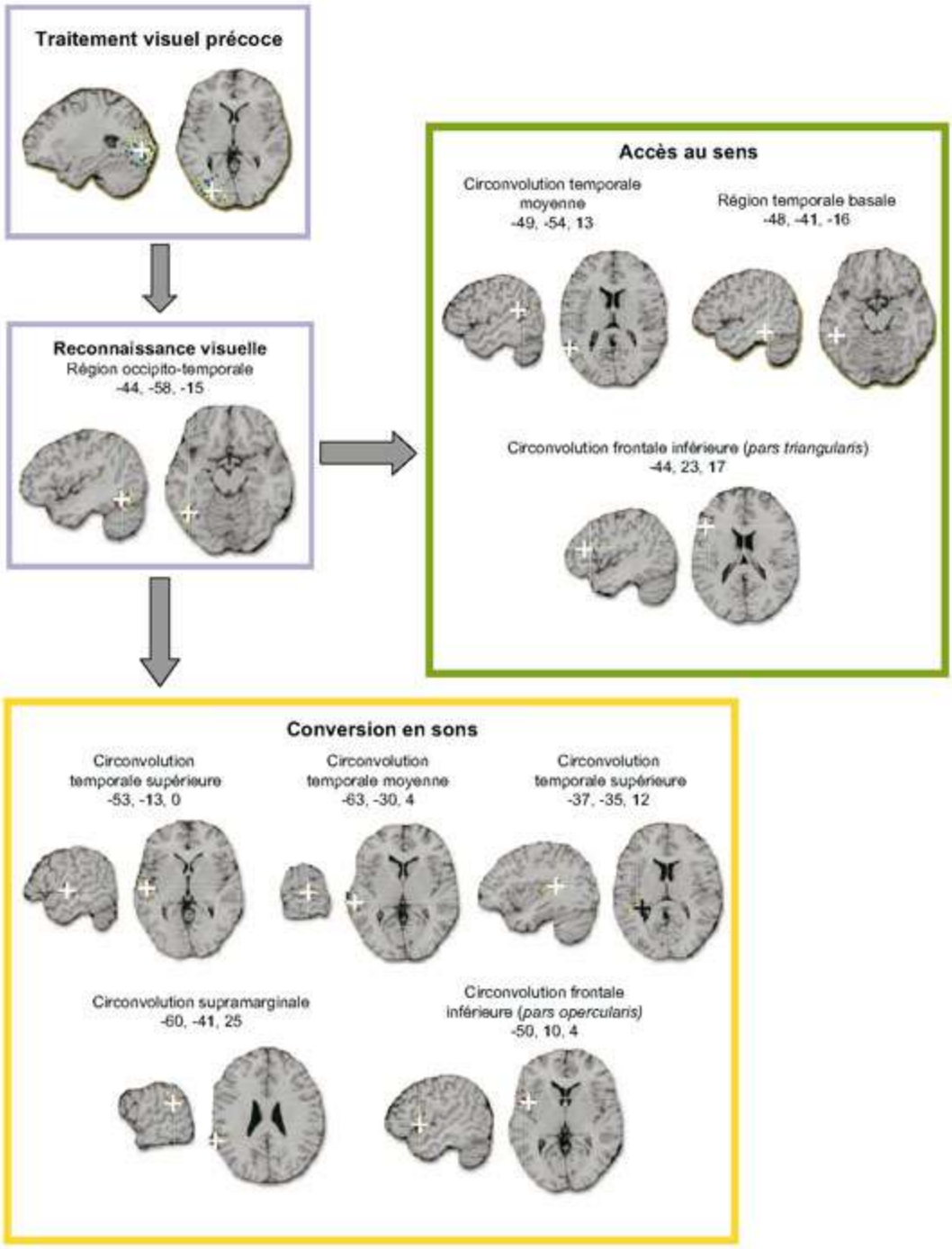


Figure 2.18 Les deux voies de la lecture, qui permettent l'accès à la sonorité ou au sens des mots, activent des aires cérébrales distinctes. Selon cette réanalyse de dizaines d'expériences, après l'analyse visuelle de la chaîne de lettres (en haut à gauche), deux grands ensembles de régions anatomiques sont impliqués dans le décodage du son et du sens (d'après Jobard et coll., 2003).

Les résultats obtenus par ces deux moyens s'avèrent remarquablement convergents[104]. Les deux voies de lecture postulées par les psychologues

correspondent bien à deux réseaux distincts d'aires cérébrales (figure 2.18). Il est donc légitime de parler de réseaux cérébraux du son et du sens.

La conversion des lettres en sons

Commençons par le décodage des lettres en sons. La voie de décodage graphème-phonème implique essentiellement les régions supérieures du lobe temporal gauche, dont on sait qu'elles sont principalement impliquées dans l'analyse des sons, et notamment les sons de parole, ainsi que le cortex frontal inférieur et précentral gauche, qui intervient dans l'articulation. C'est au niveau du lobe temporal que les lettres vues et les sons entendus se rejoignent. En témoigne une expérience très simple, illustrée dans la figure 2.19[105]. Au cours d'une expérience d'IRM fonctionnelle, nous présentons parfois des lettres seules, parfois des sons de parole seuls et parfois les deux simultanément. Dans ce dernier cas, la lettre et le son peuvent être congruents (par exemple la lettre « o » et le son *o*) ou incompatibles (la lettre « a » et le son *o*). On constate que toute une partie du lobe temporal s'active à la vision d'une lettre. Cependant, seule une région supérieure du lobe temporal, connue sous son nom latin de *planum temporale*, réagit à la compatibilité entre les lettres et les sons : l'écoute d'un son compatible avec la lettre augmente l'activité de cette région, alors qu'un conflit entre la lettre et le son se traduit par une réduction d'activité. Grâce à la magnéto-encéphalographie, on peut chronométrer cet effet : la conversion des lettres en sons débute dès 225 millisecondes après l'apparition de la lettre sur la rétine, et la compatibilité avec le son est reconnue après 400 millisecondes environ[106].

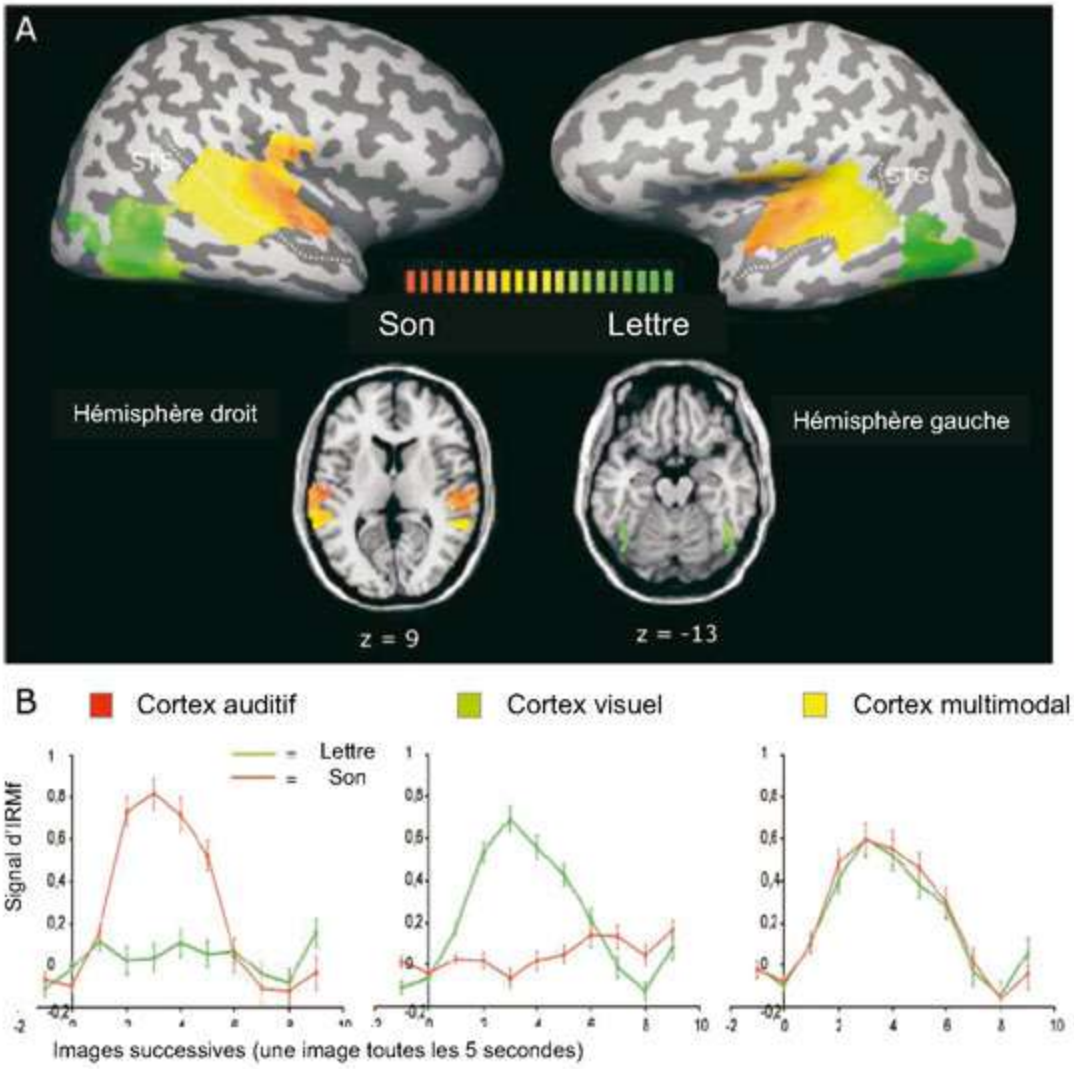


Figure 2.19 La région temporale supérieure intervient dans la conversion des lettres en sons. L'imagerie cérébrale distingue aisément les régions visuelles, activées par la vision d'une lettre, et les régions auditives activées par l'écoute d'un son. Toute une partie du cortex temporal supérieur, représenté en jaune, est multimodale, c'est-à-dire qu'elle s'active autant par l'écrit que par l'oral (d'après Van Atteveld et coll., 2004).

Attardons-nous un instant sur cette région du *planum temporale*, qui code la sonorité des lettres et des mots, car elle est probablement l'une des aires cérébrales les plus importantes pour le traitement du langage parlé. C'est une région asymétrique : sa surface est plus importante dans l'hémisphère gauche que dans l'hémisphère droit. Beaucoup de chercheurs s'accordent à voir dans cette asymétrie anatomique, présente avant même la naissance et dont des précurseurs existent chez les autres primates, l'origine de la latéralisation du langage dans l'hémisphère gauche. Chez le bébé, le *planum temporale* est déjà activé par la parole dans l'hémisphère gauche

dès les tout premiers mois de vie[107]. Très vite, cette région apprend à prêter attention aux sons pertinents, et à négliger ceux qui ne seront pas utiles dans la langue[108].

Parce qu'il permet la rencontre des informations visuelles et auditives, le *planum temporale* joue vraisemblablement un rôle de carrefour essentiel à l'apprentissage de la lecture. Lorsque nous ânonnons notre b.a.-ba, le *planum temporale* apprend progressivement à reconnaître les correspondances entre la sonorité et l'apparence des lettres. À l'âge adulte, ces liens entre graphèmes et phonèmes s'automatisent et prennent la forme d'un véritable réflexe de conversion des lettres vers les sons.

D'autres régions que le *planum temporale* interviennent dans la conversion des lettres en sons, mais les réseaux qu'elles forment ne sont pas encore bien connus. Dans le cas des lettres isolées, il est possible que la région temporale supérieure soit contactée en droite ligne à partir des aires visuelles. Toutefois, la conversion de chaînes de lettres plus complexes requiert un traitement sériel, lettre après lettre ou au moins syllabe après syllabe. Celui-ci fait intervenir la région pariétale inférieure qui se situe juste au-dessus du *planum temporale*. Elle forme vraisemblablement, avec une partie de l'aire de Broca (la région operculaire), un circuit qui s'active lorsque nous prononçons mentalement les mots[109]. Ce circuit participe à une boucle articulatoire interne, que nous utilisons lorsque nous nous répétons des sons en mémoire, par exemple pour retenir un numéro de téléphone[110]. Cette mémoire tampon pourrait jouer un rôle essentiel lorsque nous assemblons la prononciation d'un mot à partir de la suite de ses lettres – par exemple pour décrypter, syllabe après syllabe, la formule de l'aspirine : *acide acétylsalicylique.*

L'accès au sens

Le réseau de régions cérébrales qui nous sert à analyser le sens des mots est bien distinct. Je n'en ai représenté que quelques nœuds essentiels sur la figure 2.18. Peu importe, d'ailleurs, leur position anatomique précise (l'arrière de la circonvolution temporale moyenne, la face ventrale antérieure du lobe temporal et la partie triangulaire de la région frontale inférieure). Ce qu'il faut bien comprendre, c'est qu'aucune de ces régions n'est spécifique aux mots écrits : toutes interviennent également lorsque

nous réfléchissons aux relations conceptuelles entre des mots parlés[111] ou même entre des images[112]. Ainsi s'activent-elles fortement dans un test classique d'associations sémantiques où une personne voit par exemple un palmier, une pyramide et un marteau, et doit déterminer quelles images vont ensemble. Ces régions n'ont aucune information sur la prononciation de mots correspondants – mais elles « savent » que le palmier et la pyramide appartiennent au même champ sémantique.

Une des particularités de ces aires cérébrales du sens est d'être actives avant même que l'on ait demandé au participant d'effectuer un travail mental. La région temporo-pariétale postérieure, notamment, est déjà activée dans l'état de repos. En général, on ne la voit pas s'activer en réponse aux mots écrits et parlés, mais elle se « désactive », en dessous de son niveau initial, quand on présente des pseudo-mots dépourvus de sens[113]. Pourquoi cet étrange profil de réponse ? Dès que nous sommes éveillés, notre cerveau génère une incessante activité qui fait sens du monde qui l'entoure. Cette réflexion interne active spontanément le réseau du traitement sémantique des mots et des images – et celui-ci s'interrompt brièvement lorsqu'une chaîne de lettres ne fait pas sens. Notre dialogue intérieur active des régions qui forment un espace conscient et ne restent jamais en vrai repos. La notion d'un zéro absolu de l'activité cérébrale, par rapport auquel on pourrait facilement identifier les activations induites par les stimulations extérieures, n'est qu'une illusion.

Dès que l'on aborde les aires cérébrales de haut niveau d'abstraction, telles les régions associées au sens, on ne peut donc plus négliger leur état d'activité spontanée qui fluctue en permanence, indépendamment du monde extérieur. Il faut alors inventer des moyens indirects de les identifier. L'un de ces moyens consiste à étudier leur sensibilité à la répétition : quelles régions détectent que deux mots ont le même sens ? Considérons les mots « sofa » et « canapé ». Les lettres qui les composent n'ont rien de commun, pourtant ils ont pratiquement le même sens. Joe Devlin et ses collaborateurs[114] ont présenté des synonymes de cette nature dans une expérience d'amorçage subliminal, où le premier mot était inconscient et seul le second était visible. Une seule région semblait reconnaître la relation de sens : la région temporale moyenne gauche était moins active en réponse à des synonymes qu'à des paires de mots sans lien particulier, tels que « miel » et « canapé ». Tout se passait comme si la région s'activait plus

longuement lorsqu'elle devait coder deux mots de sens différents, alors que, pour les synonymes, elle ne s'activait qu'une seule fois.

L'expérience de Devlin et ses collaborateurs a finement dévoilé comment le cerveau passe des lettres au sens. La région occipito-temporale, comme je l'ai déjà souligné, ne s'intéresse qu'aux chaînes de lettres. Aussi diminue-t-elle d'activité dès que les mots se ressemblent sur le plan visuel (par exemple chasseur/chasse), même s'ils n'ont aucun rapport au niveau du sens (par exemple menteur/menthe), et elle ne change pas d'activité en réponse à des synonymes tels que sofa/canapé. Inversement, la région temporale moyenne ne s'intéresse qu'au sens des mots. Elle diminue donc d'activité pour sofa/canapé, ainsi que pour chasseur/chasse – mais pas lorsqu'il n'y a qu'une relation superficielle, de type menteur/menthe, entre les mots présentés.

D'autres études confirment que cette région temporale moyenne code le sens des mots. Par exemple, chez les lecteurs japonais, elle est la seule à reconnaître qu'un même mot est écrit dans deux notations différentes, en kanji et en kana, alors que leurs formes écrites n'ont rien de commun sur le plan visuel[115]. La région temporale moyenne est également sensible à la proximité sémantique des mots parlés[116]. Ainsi peut-on raisonnablement penser que son rôle consiste à récupérer, au sein d'un lexique sémantique, les éléments de sens associés à chaque mot.

Nous n'en sommes cependant qu'aux balbutiements de la neurologie du sens. Tant d'autres régions cérébrales s'activent lorsque nous réfléchissons au message que nous lisons. Les régions situées plus en avant dans la pointe du lobe temporal semblent s'intéresser aux combinaisons de sens que forment les mots lorsque nous les assemblons en phrases[117]. La région frontale inférieure, elle, semble jouer un rôle essentiel dans la sélection d'un sens parmi plusieurs. Elle s'active donc tout particulièrement, en coordination avec les régions temporales, lorsque nous tentons d'interpréter des phrases ambiguës[118].

Dans le domaine du sens, l'humilité est de mise car personne, pour l'instant, ne peut prétendre avoir un modèle neurologique précis de ce mystérieux éclair de compréhension qui fait que l'activité d'un réseau de neurones, à un instant, « fait sens ». Quel peut bien être l'état d'excitation de toutes ces régions temporales et frontales, par exemple lorsque nous

écoutons l'humoriste Raymond Devos nous raconter sa conversation avec un hôtelier du bord de mer :

— Où est la mer ?

— La mer… elle est démontée !

— Vous la remontez quand ?

— Question de temps…

Nous savons au moins une chose, c'est qu'il serait naïf de penser que le sens se borne à un petit nombre de régions cérébrales. Au contraire, la sémantique fait appel à de très vastes populations de neurones distribuées dans toutes les régions du cortex. Les régions frontales et temporales gauches, présentées dans la figure 2.18, ne sont que la face visible du réseau sémantique. Bien sûr, elles s'activent dès qu'une personne effectue un travail conceptuel. Cependant, leur fonction n'est peut-être pas de recueillir directement le sens des mots, mais plutôt de faciliter l'accès à des connaissances sémantiques représentées ailleurs, dans des régions distantes du cortex. Elles fonctionneraient comme des « zones de convergence », pour reprendre l'expression du neurologue Antonio Damasio[119], qui échangent des signaux avec de très nombreuses régions cérébrales du cortex associatif. Elles recueilleraient ainsi des fragments de sens épars, et les associeraient en faisceaux qui constitueraient, à proprement parler, le sens des mots.

Considérons par exemple le mot « mordre ». Comme de nombreux verbes, il fait référence à une action. On ne saurait comprendre le sens de ce mot sans songer aux parties du corps qu'il mobilise, la bouche, les dents, leur mouvement si particulier, peut-être également le cri et la sensation de douleur qui résultent de la morsure. Tous ces fragments de gestes, de mouvements, de sensations sont rassemblés sous l'étiquette « mordre ». Cette liaison fonctionne d'ailleurs dans les deux sens : nous prononçons le mot lorsque nous souhaitons évoquer cette conjonction particulière d'événements, et le fait de l'entendre recrée en nous ce fourmillement de fragments de sens.

La région temporale latérale joue un rôle essentiel dans cette médiation entre la forme des mots et les éléments de sens qu'ils évoquent. Il semble qu'elle se subdivise en de multiples sous-régions selon la catégorie particulière de mots à laquelle nous accédons – visages, personnes, animaux, outils… Toutes ces catégories sont associées à des territoires

distincts, chargés de collecter des fragments de sens d'origines différentes, eux-mêmes répartis ailleurs : dans la région pariétale pour les nombres ou les parties du corps, le cortex occipital pour les couleurs, la région V5 pour les mouvements, le cortex précentral et pariétal antérieur pour les actions et les gestes, l'aire 10 de Brodmann pour l'interprétation des intentions et des croyances d'autrui, le pôle temporal pour les noms propres, etc.

Au cours des vingt dernières années, cette vision éclatée de la représentation du sens dans le cerveau a été mise à l'épreuve, d'abord par la neuropsychologie, puis par l'imagerie cérébrale. Les lésions cérébrales montrent, ici encore, des effets étranges. Il n'est pas rare qu'un accident vasculaire cérébral prive sélectivement une personne de ses connaissances sur un petit domaine de sens. Ainsi connaît-on des patients qui ont perdu toute connaissance des animaux, aussi bien à l'écrit qu'à l'oral, ou même lorsqu'ils sont présentés sous forme d'images[120]. Ils sont incapables de répondre à des questions simples telles que : « Où vit un lion ? » ou : « Quelle est la couleur d'un éléphant ? » Par contre, ils conservent une excellente connaissance d'autres domaines comme celui des verbes, des outils ou des personnes célèbres. Chez d'autres patients, les animaux sont préservés, tandis qu'une autre catégorie pourra être atteinte. En croisant les lésions de plusieurs dizaines de ces patients, l'imagerie cérébrale anatomique a confirmé que des territoires corticaux distincts, répartis dans les régions temporales et frontales gauches, étaient associés à chacune de ces catégories[121]. Plus récemment, l'imagerie fonctionnelle du cerveau normal a confirmé et précisé ces localisations. Selon que nous pensons à des noms ou à des verbes, à des animaux ou à des outils, des territoires corticaux distincts s'allument[122].

Friedemann Pulvermuller et ses collègues sont allés plus loin : ils ont comparé l'activité cérébrale évoquée par des mots qui appartiennent tous à la même catégorie, celle des verbes d'action, mais qui diffèrent par leur contenu élémentaire. Certains verbes comme « mordre » évoquent des mouvements de la bouche, d'autres des actions de la main (écrire, lancer), d'autres des gestes de la jambe et du pied (shooter, marcher)[123]. Conformément à l'hypothèse d'un éclatement du sens, chacun de ces types de verbes active une région distincte de l'aire prémotrice. À chaque fois que nous réfléchissons à une action apparaît une activité neuronale à la position

appropriée sur la carte motrice de notre corps, celle qui nous sert à planifier les mouvements de nos membres.

On ne saurait mieux illustrer comment le sens des mots s'incarne, très littéralement, dans nos réseaux cérébraux. Une suite de lettres ne fait sens que dans la mesure où elle est capable d'évoquer, en quelques centaines de millisecondes, une myriade de traits sensoriels, moteurs, ou plus abstraits – position, nombre, intention, etc. En rattachant la forme d'un mot à ses traits sémantiques, les connexions du lobe temporal résolvent le problème des fondements du sens. Ferdinand de Saussure soulignait, à juste titre, l'« arbitraire du signe » qui fait que n'importe quelle suite de sons ou de lettres est susceptible de représenter n'importe quel concept. Lorsque nous apprenons une langue, cet arbitraire cesse d'exister à nos yeux. Il nous est impossible de ne pas voir dans le mot « lion » un animal, ou dans le mot « mordre » une action violente. Chacun de ces mots écrits s'attache solidement, par le biais de nos connexions cérébrales, aux neurones dispersés qui lui confèrent son sens.

Mesurer le mascaret cérébral

Comment concevoir ce formidable flux d'activité neuronale qu'est la lecture, qui conduit en quelques instants depuis les aires visuelles jusqu'à l'activation simultanée de dizaines de fragments de sens ? Je voudrais proposer une métaphore fluviale. Dans certaines rivières telles que la Gironde survient, deux fois par jour, un curieux phénomène : le mascaret. L'onde de marée, partant de la côte, remonte les estuaires et pénètre profondément dans les terres. À plusieurs dizaines de kilomètres de l'embouchure, plusieurs heures après la marée, on voit soudain remonter à contre-courant une série de vagues qui, si la forme du fond et des rives s'y prête, prennent de l'amplitude et déferlent. Aucune eau salée, bien sûr, ne parvient aussi loin des côtes. Il ne s'agit que d'une onde, reflet indirect du mouvement des masses d'eau sur la côte, dont il faut imaginer la propagation et la dispersion synchrone à tout un réseau hydrographique. Seul un satellite, filmant le phénomène à l'échelle d'une région tout entière, serait capable de prendre la juste mesure de cette propagation qui synchronise, pendant quelques instants, les berges de rivières distantes, qui n'entretiennent pas d'autres liens que celui de se jeter dans la même mer.

Le mascaret fournit une excellente métaphore de la manière dont un mot, écrit ou parlé, accède à son sens. Entre un mot significatif comme « fromage » et un mot inconnu comme « plicate », seule change la taille du raz-de-marée qu'ils sont capables de susciter, leur capacité de déferler plus ou moins loin dans nos circuits cérébraux. Un mot connu entre en résonance avec les réseaux du lobe temporal, et il fait vibrer, comme une puissante déferlante, les millions de neurones qui lui sont associés, jusque dans les régions les plus distantes du cortex ; alors qu'un mot inconnu, même s'il franchit avec succès les toutes premières étapes de l'analyse visuelle, ne trouve pas d'écho cortical, et la vague de potentiels d'action qu'il suscite se brise en une écume neuronale incohérente.

Peut-on suivre, en temps réel, ce mascaret sémantique ? En 1995, j'avais réalisé une expérience très simple, dont le but était de mesurer la vitesse des étapes essentielles de la lecture[124]. J'avais tout simplement enregistré l'électro-encéphalogramme alors que des sujets anglophones examinaient des chaînes de lettres. Certaines, telles PGQLST, n'étaient constituées que de consonnes et violaient donc les règles orthographiques de l'anglais au niveau de la forme même du mot. D'autres formaient des mots qui appartenaient à l'une des quatre catégories : les nombres, les noms propres, les animaux et les verbes d'action.

En mesurant, milliseconde par milliseconde, l'évolution du voltage à la surface du scalp, je pouvais déterminer combien de temps prennent les deux grandes étapes de la lecture : le filtre visuel, qui ne laisse passer que les mots bien formés, conformes aux règles de la langue ; et le filtre sémantique, qui oriente les mots en fonction de leur sens et bloque ceux qui en sont dépourvus. L'expérience a montré qu'il fallait environ 180 millisecondes pour que les chaînes de consonnes soient distinguées des autres mots (étape visuelle, liée à la région occipito-temporale ventrale) et seulement 80 millisecondes supplémentaires pour que les quatre catégories de sens commencent à activer des secteurs distincts du cortex. Ainsi, un quart de seconde suffit pour que le mascaret évoqué par un mot écrit aborde les premiers rivages du sens.

La magnéto-encéphalographie permet aujourd'hui d'aller plus loin que mon expérience d'alors. Elle montre la vague d'activité cérébrale, non plus seulement de l'extérieur, à la surface du scalp, mais en profondeur, sur le cortex même. Il devient possible de réaliser de véritables films d'animation

où l’on suit, au ralenti, la succession de régions corticales contactées par un mot. Panagiotis Simos et ses collaborateurs de l’Université du Texas sont ainsi parvenus à retracer le trajet cérébral de mots choisis pour évoquer des parcours différents dans les canaux corticaux. Ils ont tout simplement demandé à leurs volontaires de nommer, à haute voix, des chaînes de lettres qui appartenaient à trois catégories :

• Certaines étaient des pseudo-mots tels que « traphe » ou « glos » qui respectent l’orthographe de la langue mais sont dépourvus de toute signification. Pour les prononcer, on ne peut qu’emprunter la voie de conversion graphème-phonème qui applique aveuglément les règles de prononciation du français. La déferlante devrait donc envahir les régions temporales supérieures associées à la prononciation des mots, mais pas celles impliquées dans la représentation de leur sens.

• D’autres étaient des pseudo-homophones, ce qui signifie qu’ils sonnaient comme des mots, mais étaient écrits avec une orthographe anormale (par exemple « grau » ou « taite »). Là encore, on ne peut les prononcer qu’en utilisant la conversion graphème-phonème. Cependant, une fois lus, ils évoquent un sens.

• Enfin, une troisième catégorie ne comprenait que des mots authentiques et fréquents, mais à la prononciation irrégulière, tels que « oignon » ou « femme ». Avec ceux-ci, on s’attend à l’ordre d’activation inverse : impossible de récupérer directement la prononciation, puisque celle-ci n’est pas régulière et ne peut pas se déduire de la suite des lettres qui composent le mot. Il faut d’abord reconnaître le mot avant d’en recouvrer la prononciation. Le mascaret cérébral devrait, dans ce cas, inonder d’abord les régions du sens, puis celles du son.

Les résultats furent en tout point conformes à ce modèle. Jusqu’à 150 millisecondes, l’activité cérébrale restait confinée aux régions visuelles occipitales, puis vers 200 millisecondes elle envahissait la région occipito-temporale ventrale gauche, responsable de l’analyse visuelle du mot. À ce stade, aucune différence entre les trois catégories n’était détectable. Mais, très vite, celles-ci divergeaient : les pseudo-homophones et les pseudo-mots activaient principalement la région temporale supérieure et particulièrement le *planum temporale*, siège des aires auditives et notamment de la prononciation des sons du langage. Les mots irréguliers, quant à eux, activaient la région temporale moyenne, siège des « zones de convergence »

sémantiques – c'est seulement ensuite qu'ils donnaient lieu à une seconde vague d'activité dans les aires auditives. Les régions sémantiques ne s'activaient guère lorsqu'on présentait des pseudo-mots dépourvus de sens. Par contre, elles s'activaient fortement, quoique tardivement, lors de la présentation d'homophones de mots existants, tels que « taite ».

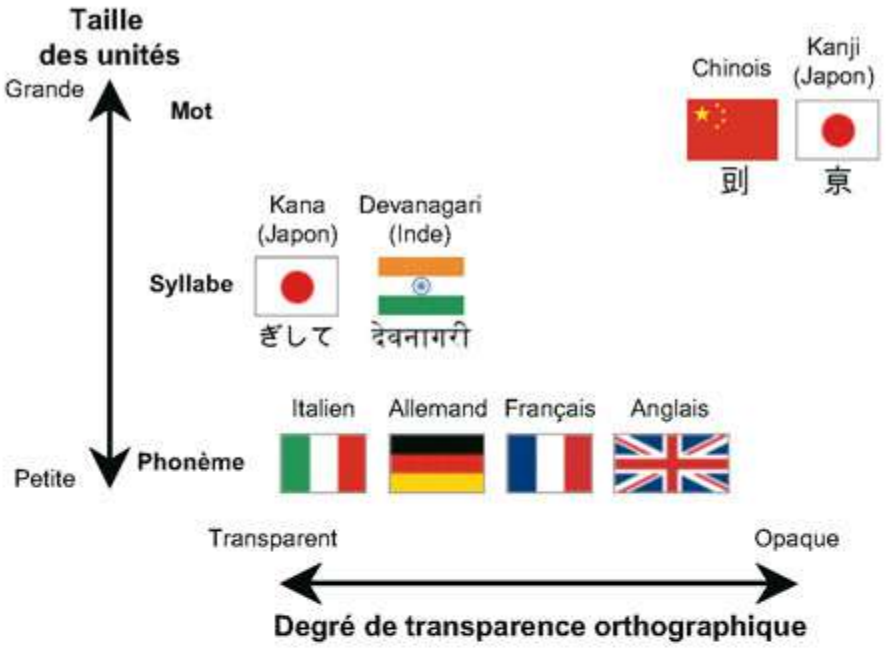
Ainsi l'imagerie cérébrale permet-elle de répondre à l'une des questions fondamentales de la psychologie de la lecture : doit-on toujours prononcer les mots mentalement avant de les comprendre ? Ou bien peut-on passer directement des lettres à la signification des mots sans qu'il soit nécessaire d'en recouvrer la prononciation ?

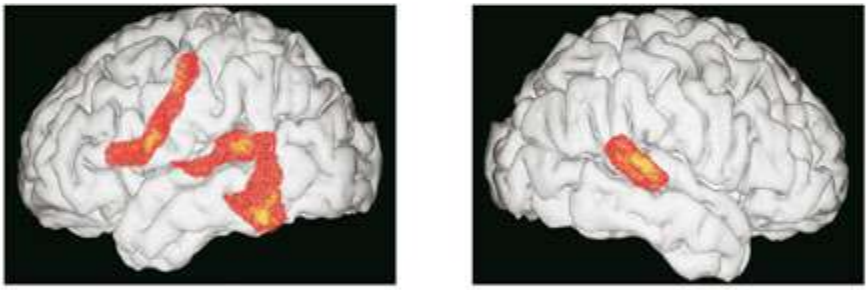
Réponse : ces deux voies de lecture coexistent et se font la course. Selon les mots que nous lisons, le mascaret cérébral emprunte de préférence l'une ou l'autre de ces voies. Les mots fréquents ou irréguliers accèdent en droite ligne aux régions sémantiques du lobe temporal moyen – dans l'expérience de Simos, le temps que mettaient les volontaires à les prononcer était d'ailleurs bien prédit par la latence avec laquelle cette région s'activait. Au contraire, d'autres mots, qu'ils soient rares, réguliers, ou tout simplement inconnus, sont d'abord prononcés mentalement dans les aires auditives du lobe temporal supérieur avant d'être éventuellement associés à un sens – dans l'expérience de Simos, leur vitesse d'élocution était d'ailleurs prédite par la latence d'activation des régions auditives.

L'unité dans la diversité

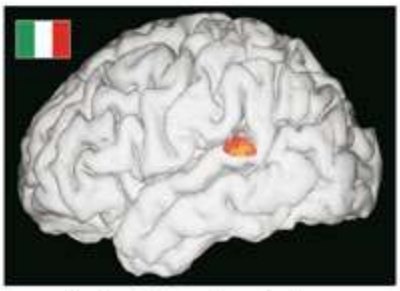
À présent que nous comprenons mieux les deux chemins de la lecture, la voie phonologique et la voie sémantique, revenons à la question des différences entre les langues. Comme je l'ai expliqué au chapitre 1, les systèmes d'écriture diffèrent dans leur « transparence orthographique » (voir la figure 2.20)[125]. L'écriture de certaines langues, comme l'italien, est « transparente » : les règles qui permettent de passer des lettres aux sons ne souffrent pratiquement aucune exception. Il suffit donc d'apprendre à prononcer chacune des lettres, et l'on sait lire aussi bien les mots que les néologismes. D'autres langues sont plus « opaques ». En anglais, par exemple, la même suite de lettres « ough » peut se prononcer très différemment selon qu'elle figure dans les mots « tough » (prononcé *taf*) ou « bough » (prononcé *bow*). On ne peut donc se contenter d'apprendre

quelques règles de conversion graphème-phonème : pour lire à haute voix, le lecteur anglophone doit posséder un grand lexique mental et l'utiliser afin de retrouver la prononciation des mots. Il y a tant d'exceptions aux règles de la prononciation que la mémoire des mots est constamment sollicitée.

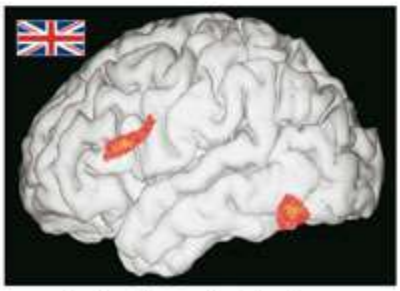




Réseau commun à la lecture de l'italien et de l'anglais



Activation plus forte en italien



Activation plus forte en anglais

Figure 2.20 La transparence de l'orthographe influence l'organisation du cerveau du lecteur. Les écritures se distinguent selon la taille des unités qu'elles dénotent (phonème, syllabe ou mot) et leur degré de transparence orthographique, c'est-à-dire la régularité de la relation entre l'écrit et l'oral (en haut). Si l'on contraste la lecture en italien, langue très régulière, et en anglais, où abondent les exceptions, on constate de petites modulations au sein d'un vaste réseau d'aires cérébrales communes (au centre) : l'italien facilite l'accès direct aux aires auditives du lobe temporal, alors que l'anglais sollicite un peu plus la région de la forme visuelle des mots et la région frontale inférieure gauche (d'après Paulesu et coll., 2000).

Les écritures chinoise et japonaise se situent évidemment à l'un des extrêmes de cette échelle de transparence. Dans ces écritures, il n'existe pratiquement pas d'alternative à l'apprentissage par cœur des caractères, de leur sens et de leur prononciation. Seules subsistent, en chinois, quelques lois statistiques, qui font que tel marqueur phonétique se prononcera fréquemment *ma*, tel autre *ti*, etc. Cependant, les marqueurs phonétiques sont si nombreux qu'on hésiterait à parler ici de « règles » de conversion graphème-phonème. Il s'agit plutôt d'associations probables entre les caractères et les sons, sans qu'aucune règle précise ne gouverne leur construction.

Quel est l'impact de ces variations culturelles sur les circuits de la lecture ? Une fois de plus, l'impression d'unité prévaut. L'imagerie cérébrale indique que, s'il existe bien des différences entre lecteurs de l'italien, de l'anglais ou du japonais, ces différences ne conduisent qu'à des modulations des mêmes circuits universels (figure 2.20). Les deux voies de la lecture existent chez tous les lecteurs, et elles font universellement appel aux mêmes aires cérébrales. Simplement, chaque langue pondère avec plus ou moins de force l'usage de ces différentes voies. Les écritures qui dénotent principalement les mots – les kanji et les caractères chinois en font évidemment partie – conduisent à une activation supérieure des régions impliquées dans la représentation du sens (en particulier la région temporale postérieure gauche). D'autres écritures qui dénotent principalement les sons – écritures alphabétiques, pinyin, kana – tendent à activer plus directement les régions auditives où sont représentés les sons du langage (particulièrement la région temporale supérieure gauche et le gyrus angulaire[126]).

La même différence se retrouve au sein des écritures alphabétiques[127]. L'italien, langue transparente, active un peu plus fortement les aires auditives du lobe temporal, sans doute parce que la conversion des lettres en sons y est plus directe. Au contraire, l'anglais, dont l'orthographe est opaque, active un peu plus fortement la région frontale inférieure impliquée

dans l’analyse lexicale et sémantique des mots. L’anglais exige également une analyse visuelle un peu plus prononcée de la part de la région occipito-temporale gauche. Sans doute l’extraction de la forme des mots y est-elle plus complexe : là où le lecteur italien peut se contenter d’identifier la suite des lettres et passer directement aux sons, l’anglais doit coder le contexte de chaque lettre afin de reconnaître les graphèmes complexes tels que « ou », « gh », ou « ing » qui, seuls, permettent une certaine conversion en sons.

En un sens, ces différences entre langues ne sont que des formes exacerbées des différences qui existent, au sein d’une langue telle que le français, entre les mots réguliers, et les mots irréguliers. Lorsque nous lisons un mot tel que « chœur », notre activité cérébrale ressemble à celle d’un lecteur anglais : nous amplifions l’usage de la voie lexico-sémantique, ce qui nous permet de reconnaître que, dans le contexte particulier de ce mot, « ch » se prononce *k* et que la lettre « o » ne se prononce pas. Inversement, lorsque nous lisons un mot régulier ou nouveau, tel « acide acétylsalicylique », nous nous reposons sur la voie de conversion graphème-phonème qui passe par le lobe temporal supérieur, comme le ferait un lecteur italien.

Ainsi pouvons-nous conclure à l’unité fondamentale des circuits de la lecture. Les réseaux cérébraux de la lecture constituent un invariant anthropologique qui fait partie intégrante de la nature humaine. Par-delà la diversité des règles particulières de transcription des sons, tous les lecteurs font appel au même réseau anatomique de régions cérébrales. Un caractère chinois ou une suite de lettres hébraïques subissent le même traitement cérébral. Après un prétraitement visuel, les caractères écrits sont canalisés aux régions ventrales du lobe temporal gauche, où ils sont reconnus indépendamment de leur forme, de leur taille et de leur position. Puis, cette information visuelle invariante est envoyée dans deux principaux circuits, l’un qui les convertit en sons, l’autre qui en retrouve le sens. Ces deux voies travaillent en parallèle, et l’une l’emporte alternativement sur l’autre en fonction de la régularité du mot et de la langue dans laquelle il est écrit.

Les paradoxes de l’universalité

L’universalité des régions cérébrales impliquées dans la lecture ne fait que poser avec plus d’acuité le paradoxe de son évolution. Comment notre

cerveau acquiert-t-il des circuits cérébraux spécialisés pour la lecture ? Pourquoi la même région, à quelques millimètres près, est-elle toujours impliquée dans la reconnaissance visuelle des mots ? Comment se peut-il que cette région dispose précisément des compétences nécessaires à la lecture : invariance spatiale, capacité d'apprendre la forme des lettres, connexions étendues avec les multiples aires du langage ? Toutes ces propriétés n'impliquent-elles pas que notre cerveau soit prédisposé à la lecture ?

Tout ce que nous savons de l'histoire de l'écriture, cependant, infirme cette hypothèse. L'invention de l'écriture est bien trop récente pour que notre génome s'y soit adapté. Au cours des centaines de milliers d'années qui ont accompagné le long cheminement de notre espèce, notre cerveau s'est adapté au langage et à la socialisation – mais pas à la lecture, qui ne date que de quelques milliers d'années.

Si nous lisons avec un système visuel ancien, essentiellement un cerveau de primate, c'est donc vers celui-ci qu'il nous faut à présent orienter nos recherches. Chez nos cousins primates, à quoi servent les régions cérébrales que nous dévouons à la lecture ? Et comment leur fonction initiale peut-elle être détournée au profit d'une activité aussi nouvelle que la reconnaissance des mots ?

Chapitre 3
Les neurones de la lecture

Comment les mots écrits sont-ils représentés au niveau neuronal ? L'homme est un primate (presque) comme les autres. La lecture fait appel aux mécanismes neuronaux de la vision, qui n'ont guère changé au cours de notre évolution. Le cortex temporal inférieur du singe macaque abrite une hiérarchie de neurones qui répondent à des fragments de scènes visuelles. Collectivement, les préférences de ces neurones forment un alphabet de formes élémentaires dont les combinaisons sont capables de représenter n'importe quel objet. Certains neurones répondent même déjà à des formes proches de celles des lettres (T, Y, L), dont on peut montrer qu'elles constituent des invariants utiles à la reconnaissance des contours des objets. Selon l'hypothèse du « recyclage neuronal », lorsque nous apprenons à lire, une partie de cette hiérarchie neuronale se reconvertit afin de reconnaître la forme des lettres et des mots.

« L’homme dans son arrogance se croit un chef-d’œuvre digne de l’intervention d’un dieu. Il est plus humble, et à mon avis plus vrai, de le considérer comme créé à partir des animaux. »

Charles DARWIN,
Carnets, 1838

« Je ne peux pas avaler l’idée que l’homme soit aussi distinct du chimpanzé que l’ornithorynque du cheval ; je me demande bien ce qu’en dirait le chimpanzé ! »

Charles DARWIN,
Lettre à Huxley, 1863

Nul mieux que Charles Darwin n’a défendu l’idée d’une filiation des compétences cognitives humaines dans l’évolution. Dès la fin du XIX^{e} siècle, dans ses livres *La Filiation de l’homme* (1871) et *L’Expression des émotions chez l’homme et les animaux* (1872), Darwin avait collecté des centaines d’observations qui suggéraient que bon nombre de nos comportements trouvaient leur origine chez l’animal. Même le langage, affirmait-il, n’échappe pas à cette règle : « L’homme a une tendance instinctive à parler, comme on le voit dans le babillage des jeunes enfants. »

Lorsqu’il s’agissait de comprendre les facultés intellectuelles supérieures, Darwin n’en faisait pas mystère : ce sont les primates, affirmait-il, et notamment les chimpanzés, qui détiennent le secret de nos origines. Très tôt, les hypothèses de Darwin ont inspiré un vaste programme de recherche, toujours d’actualité, dont l’objectif est la comparaison systématique du cerveau de l’homme avec celui des autres primates.

Le programme de Darwin s’applique-t-il à la lecture ? Tel est le pari que je fais dans mes recherches : on ne comprendra les circuits de la lecture qu’en les rapprochant des réseaux de neurones qui, chez les autres primates,

servent à la vision. Ces réseaux ne sont pas fondamentalement différents chez l'homme. Mais nous les *recyclons* en vue d'un autre usage. L'apprentissage de la lecture fait du neuf avec du vieux. Les mêmes régions cérébrales sont à l'œuvre lorsque nous lisons et lorsque nous reconnaissons un objet – certains territoires se sont simplement spécialisés pour la forme particulière des lettres et des mots. Retraçons donc ensemble comment un siècle de recherches a démonté les mécanismes de la vision des primates. Y trouverons-nous le secret de la lecture ? Possédons-nous des neurones spécialisés pour les lettres, les syllabes ou les mots ? Quel type de code neural s'inscrit dans notre cortex lorsque nous apprenons à lire ?

Le singe, l'homme et la lecture

Dans les années 1930, à Chicago, le spécialiste du comportement Heinrich Klüver et le neurochirurgien Paul Bucy s'associent afin d'explorer les conséquences de l'ablation du lobe temporal chez le singe macaque[128]. Après une lésion bilatérale, les primates développent un ensemble de symptômes aujourd'hui connu sous le nom de « syndrome de Klüver-Bucy », qui se caractérise par des changements massifs et complexes du comportement visuel, alimentaire, social et sexuel. Ces animaux se comportent comme s'ils ne reconnaissaient plus ni leurs congénères ni les objets qui les entourent. Ils tentent d'ingérer ou de s'accoupler avec les objets les plus incongrus – une forme d'aveuglement que Klüver et Bucy, à la suite du neurologue Heinrich Lissauer (1890), appellent « cécité psychique ». En réalité, les animaux ne sont pas aveugles à la lumière, mais ils ne reconnaissent plus les formes visuelles.

Quelques décennies plus tard, les neurophysiologistes américains Karl Pribram et Mortimer Mishkin précisent les régions cérébrales à l'origine des aspects visuels du syndrome de Klüver-Bucy[129]. Ils découvrent que la cécité psychique résulte de lésions bilatérales de la région temporale ventrale (figure 3.1). Les singes affectés ne parviennent plus à discriminer les objets. Ainsi ne parviennent-ils pas à apprendre qu'un morceau de nourriture est toujours caché sous un cube rouge et jamais sous une sphère rayée de vert. Après des centaines d'essais d'entraînement, ils continuent à choisir au hasard entre ces deux objets. Cependant, les animaux ne sont pas

aveugles : ils se déplacent normalement, parviennent à repérer la position des objets et à les saisir.

Dès 1890, Lissauer avait décrit un comportement similaire chez l'homme. Il avait observé que certains patients, à la suite d'un accident vasculaire de la région temporale, ne parvenaient plus à reconnaître les objets, même si leur acuité visuelle était normale et s'ils parvenaient à les manipuler convenablement[130]. Ce déficit, qu'il appelait « cécité psychique » ou « agnosie visuelle », suggérait déjà que la reconnaissance visuelle des objets passe par des voies spécifiques, tant chez l'homme que chez les autres primates.

Chez l'homme, les régions temporales responsables de la reconnaissance des objets occupent la face ventrale du cerveau. Chez le singe macaque, elles occupent la face latérale du lobe temporal et s'étendent vers sa pointe antérieure (figure 3.1). En comparaison avec celui du singe, le cerveau de l'homme semble ainsi avoir subi une importante expansion de la plupart des régions associatives du cortex, et notamment de la région temporale antérieure et latérale, associée dans l'hémisphère gauche au traitement du langage parlé et des réseaux sémantiques.

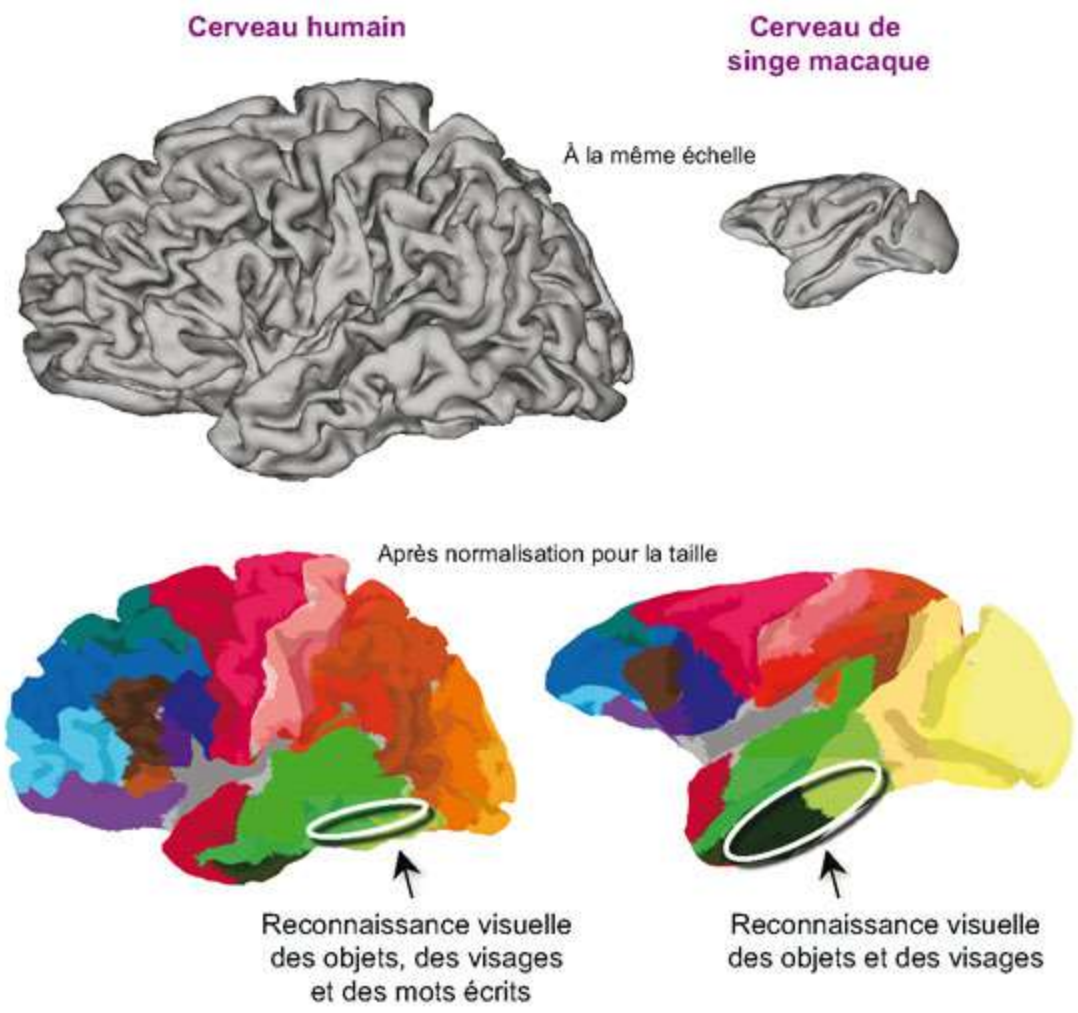

Cerveau humain
Cerveau de singe macaque
À la même échelle
Après normalisation pour la taille
Reconnaissance visuelle des objets, des visages et des mots écrits
Reconnaissance visuelle des objets et des visages

Figure 3.1 La région associée à la reconnaissance visuelle des mots chez l'homme fait partie du cortex temporal inférieur qui est impliqué, chez tous les primates, dans la reconnaissance des objets et des visages. En dépit d'une énorme différence de surface corticale (en haut), il existe de nombreuses ressemblances dans l'organisation cellulaire des couches du cortex du cerveau humain et du singe macaque, qui permettent de délimiter des régions similaires (en bas, régions codées par des couleurs).

Bien que cette expansion semble avoir repoussé les processus de reconnaissance visuelle vers le bas et l'arrière du cerveau, on reconnaît encore une homologie entre notre cerveau et celui des autres primates. En examinant l'organisation microscopique du cortex, et tout particulièrement la répartition des corps cellulaires en plusieurs « couches », l'anatomiste Korbinian Brodmann a proposé, en 1910, une subdivision des aires cérébrales qui fait toujours autorité. Il a montré que les mêmes aires se retrouvent, avec une certaine déformation, chez l'homme et chez le singe macaque. En particulier, les mêmes aires interviennent dans la

reconnaissance visuelle chez les deux espèces. Brodmann les avait numérotées : il s'agit de l'aire 20 et de l'aire 37.

Or l'activation observée chez l'homme pendant la lecture se situe dans l'aire 37 de Brodmann. Autrement dit, elle n'atterrit pas dans une région arbitraire, dont la fonction passée n'aurait rien de commun avec cette activité culturelle récente. La lecture ne fait pas appel à une aire cérébrale nouvelle. Au contraire, la reconnaissance des mots écrits repose sur une région hautement évoluée dont la spécialité, depuis des millions d'années, est l'identification visuelle des objets – celle-là même dont la lésion crée la « cécité psychique » de Lissauer et de Klüver et Bucy.

Des neurones spécialisés pour les objets

Qu'en est-il des autres propriétés essentielles à la lecture, telles que l'invariance pour la taille ou la position des mots ? Sont-elles également héritées de notre évolution ? Peut-on leur trouver un précurseur chez le singe macaque ?

Lorsque nous reconnaissons un objet, peu importe qu'il soit loin ou près, à droite ou à gauche, incliné ou droit, bien éclairé ou dans l'ombre : il est essentiel que nous parvenions à reconnaître son identité quels que soient son éclairement, son orientation, sa distance ou sa position. Au cours de l'évolution, une forte pression de sélection a donc dû s'exercer afin que s'améliore l'invariance de la reconnaissance des objets.

Nous savons à présent que cette invariance est une fonction essentielle du lobe temporal. Les singes atteints de lésions temporales inférieures ne maîtrisent plus cette invariance. Si on leur apprend, tant bien que mal, à reconnaître une forme, ils ne généralisent pas à des conditions nouvelles d'éclairement, de taille ou de position[131]. De fait, un objet éclairé sous deux angles différents, ou présenté à droite ou à gauche de la rétine, projette une image rétinienne entièrement différente. L'information visuelle doit être envoyée vers des régions cérébrales communes avant que nous ne puissions reconnaître l'invariance de l'objet. Les effets des lésions indiquent que la région temporale inférieure joue un rôle crucial dans cette collecte d'informations visuelles invariantes. Lorsque cette région est lésée, le singe voit des taches de couleur et de lumière, mais il ne parvient pas à reconnaître l'objet dont il s'agit.

Plus récemment, l'enregistrement de neurones uniques chez le singe éveillé a permis de mettre directement en évidence le code neural des objets visuels. Dès la fin des années 1960, David Hubel et Torsten Wiesel enregistrent dans l'aire visuelle primaire du chat des neurones sensibles à des traits élémentaires, plantant ainsi les premiers jalons du travail qui leur vaudra le prix Nobel en 1982. À leur suite, dans les années 1970 et 1980, d'autres électrophysiologistes (Robert Desimone, Charles Gross, David Perrett, Keiji Tanaka) placent leurs électrodes plus avant dans le cortex du singe macaque[132]. Afin de caractériser les réponses des neurones inféro-temporaux, ils assemblent une imposante bibliothèque d'images, de formes, de visages et d'objets les plus divers, qu'ils présentent successivement à l'animal tandis qu'une électrode intracorticale enregistre les taux de décharge des neurones.

Une étonnante sélectivité est alors mise au jour. Il n'est pas rare qu'un neurone ne réponde qu'à un seul visage ou à un seul objet parmi plusieurs dizaines. Le neurone de la figure 3.2, par exemple, ne répond qu'à la vue d'une chaise, et reste silencieux à la présentation de dizaines d'autres objets. Cette sélectivité est d'autant plus remarquable qu'elle s'accompagne d'une forte invariance. À la différence des neurones de l'aire primaire, qui n'ont qu'une étroite fenêtre de vision sur la rétine, le champ récepteur des neurones du cortex temporal inférieur est vaste : un neurone répond parfois à plus de la moitié du champ visuel. À l'intérieur de cette zone, le neurone continue de préférer un objet bien précis, même lorsque son image se déplace de plusieurs degrés ou que sa taille est multipliée ou divisée par deux[133]. Lorsque la lumière change, projetant ainsi des ombres complètement différentes, la plupart des neurones maintiennent une sélectivité sans faille[134].

Figure 3.2 L'enregistrement des neurones du cortex temporal inférieur du macaque démontre une remarquable sélectivité. Parmi les cent images présentées, seule la vue d'une chaise augmente fortement le taux de décharge de ce neurone (d'après Tamura et Tanaka, 2001).

Qu’en est-il de l’invariance par rotation ? Elle semble moins évidente à calculer, et demande vraisemblablement une opération supplémentaire. Les positions successives d’un visage en rotation ne sont pas codées par des régions corticales identiques, mais par des régions très proches et qui se recouvrent partiellement (figure 3.3)[135]. Lorsqu’un objet tourne sur la rétine, la plupart des neurones ne répondent qu’à la vue selon un certain axe : ils ne tolèrent qu’environ 40 degrés de rotation, puis cessent de répondre. Cependant, certains neurones répondent à un objet quelle que soit l’orientation sous laquelle il est vu (figure 3.4)[136]. On pense que ces neurones invariants par rotation recueillent les signaux de plusieurs neurones du premier type, chacun étant ajusté à un axe de vue donné.

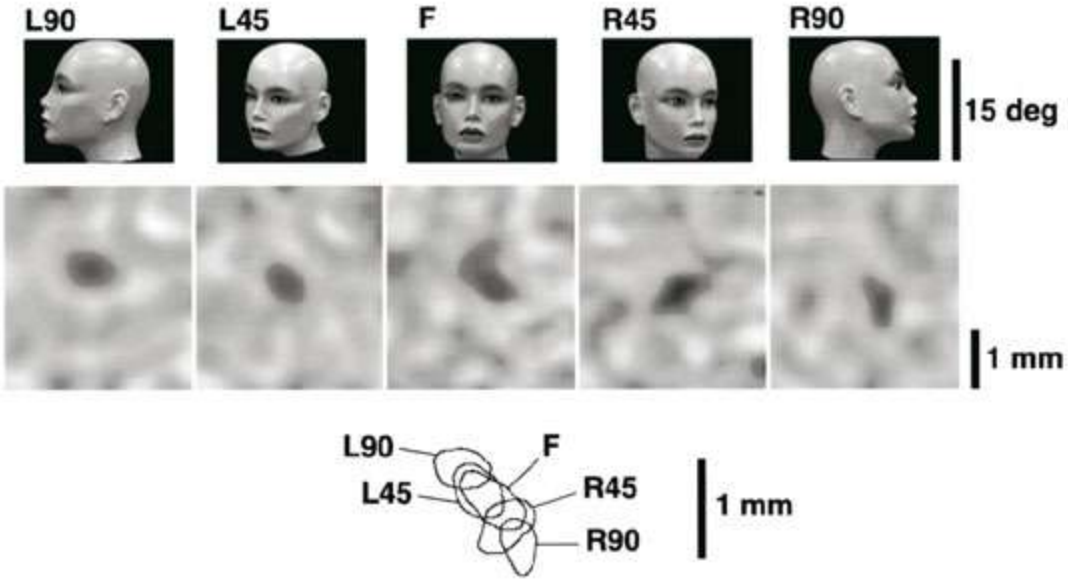


Figure 3.3 Une petite région du cortex temporal inférieur du macaque répond aux visages. La présentation d’un visage active une colonne corticale d’un diamètre de l’ordre de 500 microns, que l’on peut visualiser en imagerie optique sous forme d’une tache sombre à la surface du cortex. Lorsque le visage tourne, ses différents profils activent des régions voisines et qui se recouvrent partiellement, contribuant ainsi à l’élaboration d’un « code neural » invariant pour la rotation (d’après Tanaka et coll., 2003).

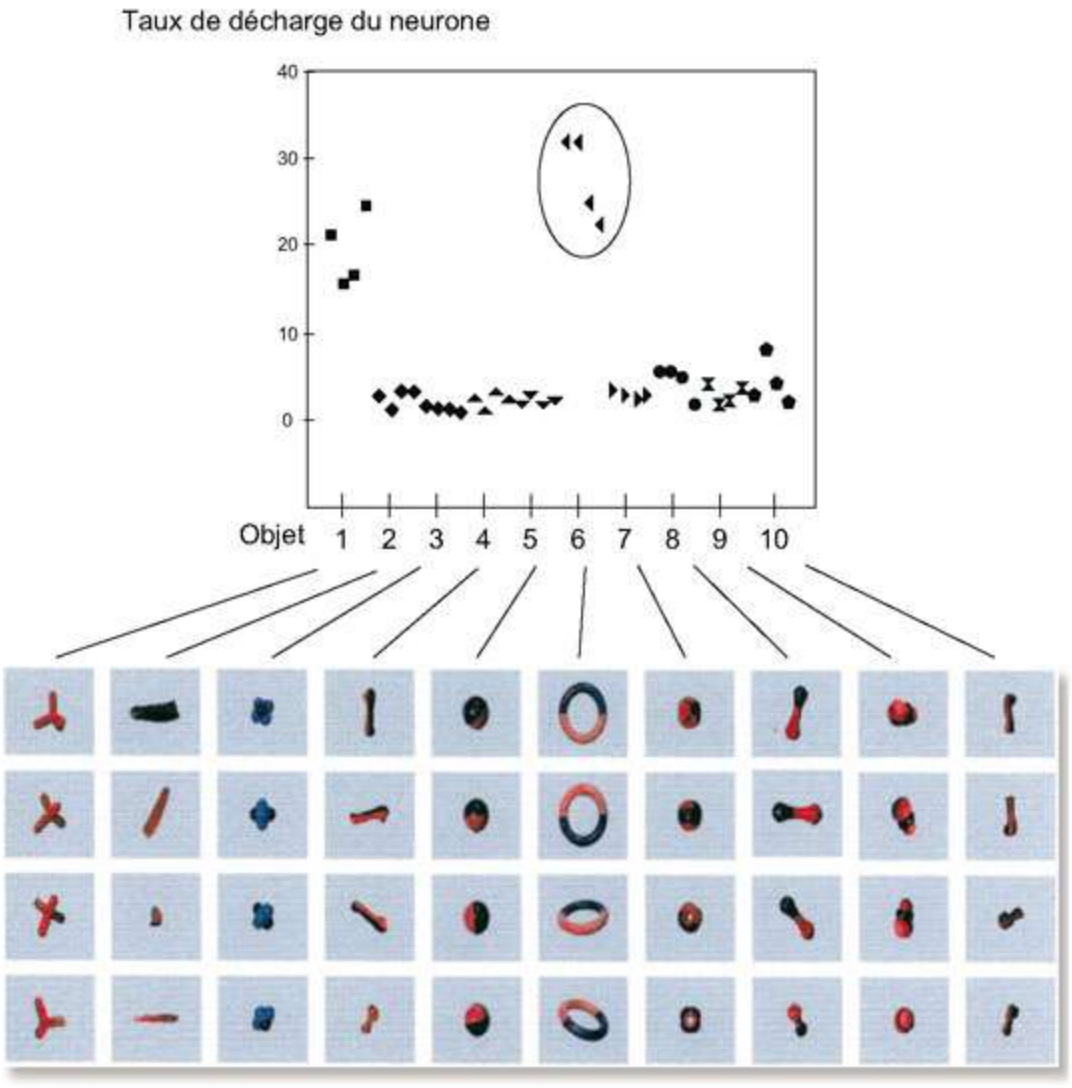


Figure 3.4 Certains neurones du cortex temporal inférieur répondent aux formes de façon sélective et invariante. Ce neurone décharge vigoureusement à la présentation d'un objet en forme d'anneau et, dans une moindre mesure, à la présentation d'un « tripode ». La réponse est indépendante de l'orientation de l'objet dans l'espace (d'après Booth et Rolls, 1998).

Ainsi, le problème de l'invariance visuelle semble-t-il résolu au niveau des neurones du cortex temporal inférieur. Le code neural, à ce niveau, devient largement invariant : on voit apparaître des populations de neurones dont l'activité évoquée ne change guère lorsque l'objet préféré s'éloigne, se déplace, change d'éclairement ou d'orientation. Ces mécanismes pré-existent à l'apprentissage de la lecture – ce sont eux qui nous permettent de reconnaître un mot indépendamment de sa position sur la page.

L'origine des neurones grand-mères

Comment se peut-il qu'un neurone unique réponde à une image parmi mille ? Faut-il supposer qu'il existe, dans chacun de nos cerveaux, des millions de neurones ultra-spécialisés ? À la limite, trouverait-on, dans mon cerveau, un « neurone grand-mère » qui ne répondrait qu'à la vue de mon aïeule, comme l'avait proposé avec un zeste d'ironie le physiologiste Horace Barlow ?

Sur le plan strictement empirique, aussi surprenant qu'il puisse paraître, la réponse est positive. Tant chez le singe que chez l'homme, on trouve des neurones si spécialisés qu'ils paraissent dédiés à une personne, une image ou un concept unique. En témoigne ce neurone enregistré dans la région temporale antérieure d'un patient épileptique, et qui ne répondait qu'à la vue de la star d'Hollywood Jennifer Aniston – en pied, en buste, en caricature, et même à la présentation de son nom écrit en toutes lettres[137] !

Cependant, même si cette sélectivité s'exprime dans l'activité du neurone, elle n'est pas la propriété d'une seule cellule. Au contraire, si l'on est capable de découvrir, en piquant une électrode au hasard, des neurones spécialisés pour une personne donnée, c'est qu'il doit en exister plusieurs millions. De plus, la spécificité neuronale résulte nécessairement d'un travail collectif en réseau. En dernière analyse, la réponse sélective d'une cellule est comme le sommet d'un iceberg : on ne pourrait l'observer s'il n'y avait pas, en dessous d'elle, toute une masse d'autres cellules qui forment une hiérarchie de détecteurs. Chaque neurone effectue un calcul élémentaire qui repose sur le bon fonctionnement de ses voisins, que ceux-ci soient excitateurs ou inhibiteurs. Un neurone, seul, ne peut presque rien. Seule une coalition d'au moins quelques centaines de neurones est susceptible d'influencer, à son tour, d'autres populations nerveuses. Chaque image, chaque visage que nous reconnaissons sont donc codés par de petits amas de cellules sélectives – c'est ce que l'on appelle le codage par populations éparses de neurones.

Comment passe-t-on de la rétine, où des millions de photo-récepteurs ne font que détecter la lumière émise par chaque fragment de l'image, au neurone qui détecte la présence de Jennifer Aniston ? La reconnaissance visuelle repose sur toute une hiérarchie neuronale, qui commence seulement à être comprise. Sur le plan anatomique, la région temporale ventrale des primates est organisée comme une pyramide. L'information visuelle entre tout en bas de cette hiérarchie, et une cascade de connexions successives

l’achemine depuis l’aire visuelle primaire jusqu’à l’extrémité du pôle temporal (figure 3.5)[138]. Cette progression anatomique s’accompagne d’un accroissement de la complexité fonctionnelle. À chaque étape, en recombinant les réponses des neurones du niveau inférieur, les neurones parviennent à répondre à des images de plus en plus riches et complexes. Le cerveau recompose, morceau par morceau, le puzzle que constitue l’image éclatée de l’objet sur la rétine.

Parcourons, par la pensée, cette pyramide neuronale. Nous y voyons une triple progression.

• D’une part, les images optimales, celles qui déclenchent la plus forte réponse du neurone, se complexifient. Par exemple, il suffit de présenter une petite barre pour faire décharger les neurones de l’aire visuelle primaire, alors que seules des courbes plus complexes, des formes, des fragments d’objets ou même des visages entiers font réagir les neurones de plus haut niveau hiérarchique.

• D’autre part, à mesure que l’on progresse dans la hiérarchie, les neurones répondent également à des secteurs de plus en plus étendus de la rétine. On dit que les « champs récepteurs » s’élargissent d’un facteur 2 ou 3 à chaque étape. Cela signifie que la zone de la rétine où la présentation de l’objet favori fait décharger le neurone voit son diamètre multiplié par deux ou trois.

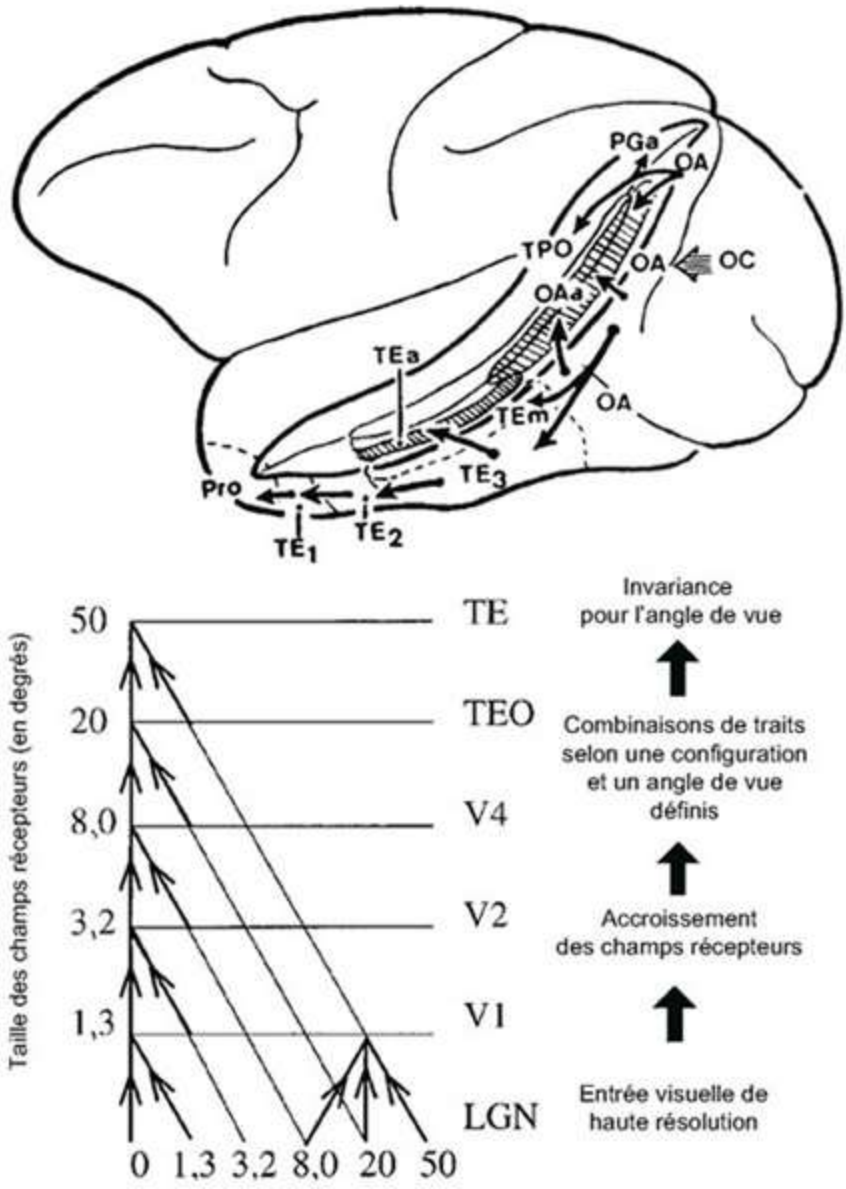


Figure 3.5 Les aires visuelles du cortex occipital et temporal inférieur forment une hiérarchie d'invariance croissante. Elles sont connectées de proche en proche selon une « pyramide synaptique ». À chaque étape, le champs récepteur, c'est-à-dire la région de la rétine à laquelle les neurones répondent, s'élargit d'un facteur 2 ou 3, tandis que les propriétés visuelles que les neurones codent deviennent de plus en plus complexes et invariantes (d'après Rolls, 2000).

• Enfin, cette progression s'accompagne également d'une invariance croissante. Les neurones du plus bas niveau sont très sensibles aux changements de position, de taille ou d'illumination. À mesure que l'on s'élève dans la hiérarchie, les cellules nerveuses tolèrent des déplacements et des déformations de plus en plus importants.

L'imagerie cérébrale fonctionnelle montre que, dans l'espèce humaine, le cortex occipito-temporal ventral obéit à des règles similaires de

hiérarchie et d'invariance croissante[139]. Ainsi, tant chez l'homme que chez les autres primates, le concept de hiérarchie neuronale fournit une solution simple au difficile problème de l'invariance visuelle – même si je vous épargne ici de nombreux détails importants. Comment faire pour reconnaître un objet donné ? Il suffit d'apprendre à le reconnaître sous chacun de ses angles. Le système nerveux dédie donc différents groupes de neurones à chaque vue de l'objet (le profil et la face du visage de Jennifer). Tous ces groupes se connectent de manière à contacter un même groupe de neurones au prochain niveau hiérarchique. On obtient ainsi un circuit élémentaire invariant pour l'angle de vue. Mais rien n'empêche de répliquer ce principe à tous les niveaux. Les neurones chargés de reconnaître, disons, le profil de Jennifer recevront eux-mêmes les votes de quelques dizaines de populations du niveau inférieur, chacune capable de reconnaître un fragment de ce visage à une échelle spatiale et une position variables. Ces neurones eux-mêmes, pour reconnaître un œil, collecteront tous les traits du niveau inférieur compatibles avec la présence d'un œil en un point donné du champ visuel.

En bref, selon ce modèle, le système visuel des primates applique une méthode de décomposition de l'image, dont les principes fondamentaux sont le parallélisme massif et la hiérarchie. Éclatée en une mosaïque de taches de lumière dans l'aire visuelle primaire, l'image mentale est progressivement recomposée par une pyramide hiérarchique de neurones. Cette approche peut paraître coûteuse : des millions de processeurs neuronaux doivent se spécialiser pour la reconnaissance d'autant de fragments d'objets. Cependant, c'est un coût très faible pour le système nerveux qui fonctionne effectivement comme un assemblage de petits calculateurs élémentaires organisés en parallèle.

De plus, cette débauche massive d'unités de calcul permet une grande économie de temps. Les neurones sont des calculateurs extraordinairement lents. En effet, on estime qu'ils ne peuvent transmettre d'informations en moins d'une dizaine de millisecondes, soit dix mille fois plus lentement que l'échelle de la microseconde qui caractérise un microprocesseur électronique. Cependant, leur organisation parallèle permet une reconnaissance extraordinairement efficace : 150 millisecondes suffisent à reconnaître un mot ou un animal, quelles que soient son identité et sa position[140].

Plusieurs modèles détaillés de la hiérarchie visuelle, fondés sur les principes que je viens d'esquisser, ont été simulés sur ordinateur[141]. Les meilleurs d'entre eux s'approchent des performances humaines, aussi bien dans leur rapidité que dans leur capacité d'invariance. Grâce à ces réseaux de neurones artificiels, la reconnaissance automatique des visages par ordinateur ou la lecture informatisée des plaques d'immatriculation ont quitté le domaine de la science-fiction pour devenir partie intégrante de notre vie quotidienne.

Un alphabet dans le cerveau des singes

Selon le modèle hiérarchique, le code neural d'un objet est constitué d'une mosaïque hiérarchique de neurones qui « votent » en faveur de cet objet parce qu'ils en ont reconnu certains traits. Ainsi, la plupart des neurones sélectifs aux objets devraient-ils répondre à certaines vues, plus ou moins restreintes et simplifiées, des parties de ces objets.

C'est cette logique qui a conduit le neurophysiologiste japonais Keiji Tanaka et ses collègues à une découverte remarquable : la présence, dans le cerveau du singe, d'une mosaïque de détecteurs neuronaux de formes élémentaires qui tapisse la surface du cortex temporal inférieur. Ces formes primitives jouent, pour la reconnaissance des objets, le rôle d'un alphabet dont les combinaisons permettent de décrire n'importe quel objet. J'appelle ces formes des « protolettres » car, non seulement elles fonctionnent comme un alphabet combinatoire, mais certaines d'entre elles ressemblent étonnamment à nos lettres !

Pour clarifier le codage neuronal des objets, Tanaka et ses collègues ont employé une procédure de simplification progressive des images (figure 3.6). En partant d'une image à laquelle un neurone répondait de façon vigoureuse, ils l'ont progressivement épurée jusqu'à atteindre la forme la plus élémentaire possible qui continuait à faire décharger le neurone. Lorsqu'un neurone répondait à l'image d'un chat, par exemple, il continuait à répondre à la simple présentation de deux disques superposés. Tel autre neurone préférait l'image d'une pomme, mais déchargeait en réalité dès qu'on lui présentait un disque noir pourvu d'une petite queue. Un troisième neurone, initialement sensible à l'image d'un cube, répondait en réalité à la jonction en forme de « Y » de ses arêtes centrales[142]. La plupart

des neurones du cortex temporal inférieur résistaient ainsi à une simplification massive des traits de l'image.

À la suite de centaines d'enregistrements individuels de ce type, et en les recoupant avec la position des électrodes, Tanaka parvint à reconstituer la mosaïque que forment ces neurones sur la surface du cortex. Une fois réduite à sa plus simple expression, la préférence des neurones varie de façon régulière et forme une carte de formes : des neurones voisins sur la surface du cortex ont tendance à coder pour des formes similaires (figure 3.6). On trouve, par exemple, toute une région du cortex dédiée à des variantes de la forme en T. D'autres secteurs du cortex sont dédiés à des formes en 8, en étoile, au profil élémentaire d'un visage… Se révèle ainsi un dictionnaire cortical de formes élémentaires. En un point donné du cortex, tous les neurones qui appartiennent à la même « colonne » transversale n'ont pas exactement les mêmes préférences, mais semblent répondre à de petites déviations métriques de la forme de base. Collectivement, ils constituent ainsi un immense répertoire de variantes de formes, capable à la fois de catégoriser l'image pour reconnaître, par exemple, la présence d'un visage, mais également d'individualiser chaque image particulière lorsque le contexte l'exige – par exemple lorsqu'il s'agit de reconnaître le visage de Jennifer Aniston, son âge ou son expression. En combinant les réponses de ces milliers de détecteurs, on comprend comment notre cortex parvient à coder une immense variété d'objets.

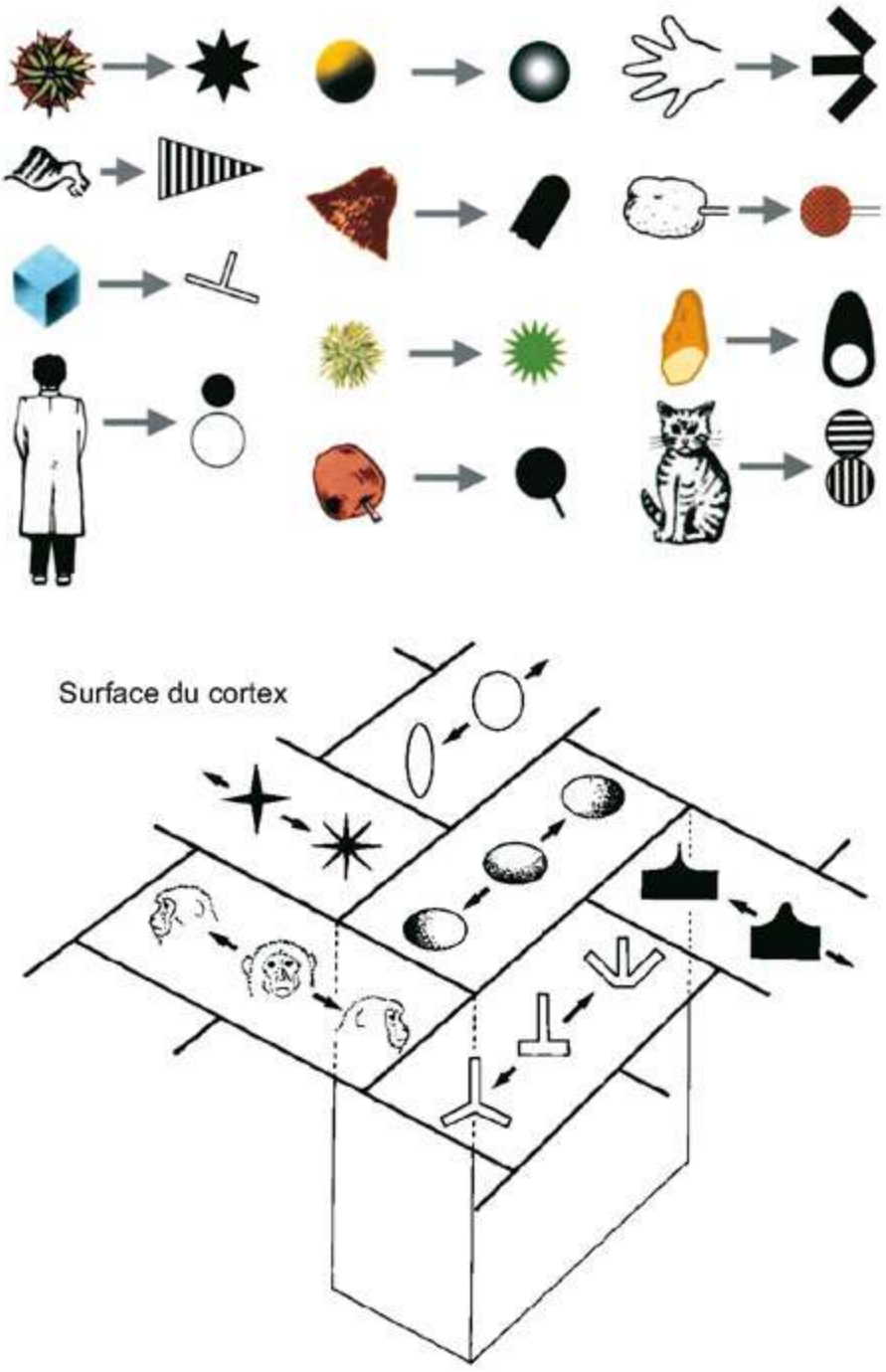


Figure 3.6 La procédure de simplification progressive de Tanaka révèle une microtopographie dans le cortex temporal. Partant d'une image qui fait vigoureusement décharger un neurone, on la simplifie progressivement jusqu'à trouver la forme la plus simple qui évoque une réponse au moins aussi forte (haut). Certaines de ces formes minimales évoquent des lettres. Les neurones qui y répondent sont organisés en colonnes. Lorsque l'on se déplace le long de la surface du cortex, la forme préférée varie continûment (d'après Tanaka, 2003).

L'un des élèves de Keiji Tanaka, Manabu Tanifuji, est ensuite parvenu à visualiser directement comment les combinaisons de ces neurones

représentent un objet quelconque. Il s'est servi d'une technique d'imagerie optique qui lui a permis de visualiser, en une seule mesure, l'ensemble du code neuronal évoqué par un objet dans le cortex temporal inférieur[143]. En mesurant, à l'aide d'une caméra vidéo très sensible, les changements de réflexion de la lumière à la surface du cortex, il est parvenu à mesurer, de façon indirecte, l'activité neuronale. En effet, la quantité de lumière réfléchie varie en fonction du métabolisme du tissu, et en particulier selon les changements d'oxygénation de l'hémoglobine dans les micro-capillaires (le même paramètre que mesure l'IRM fonctionnelle chez l'homme). Munie d'un fort grossissement, la caméra parvient à distinguer, chez le singe anesthésié, des structures activées de l'ordre de quelques centaines de microns, c'est-à-dire l'ordre de grandeur des colonnes corticales inférées par Tanaka.

Dans l'une de ses expériences, Manabu Tanifuji présente au singe l'image d'un extincteur – l'idée est de stimuler le cortex avec des objets nouveaux que les singes n'ont pas l'occasion de voir au cours de leur évolution. La mosaïque corticale qui code pour cet objet se révèle immédiatement sous forme de multiples taches éparses, bien distinctes, qui constituent la signature corticale de cet objet (figure 3.7). Enlevons à présent la poignée et le tuyau de l'extincteur, tout en conservant le corps du réservoir : certaines taches s'éteignent, d'autres restent actives, d'autres encore s'allument. À chaque objet, même nouveau et incongru, la combinatoire se modifie dynamiquement et attribue immédiatement un code neural unique.

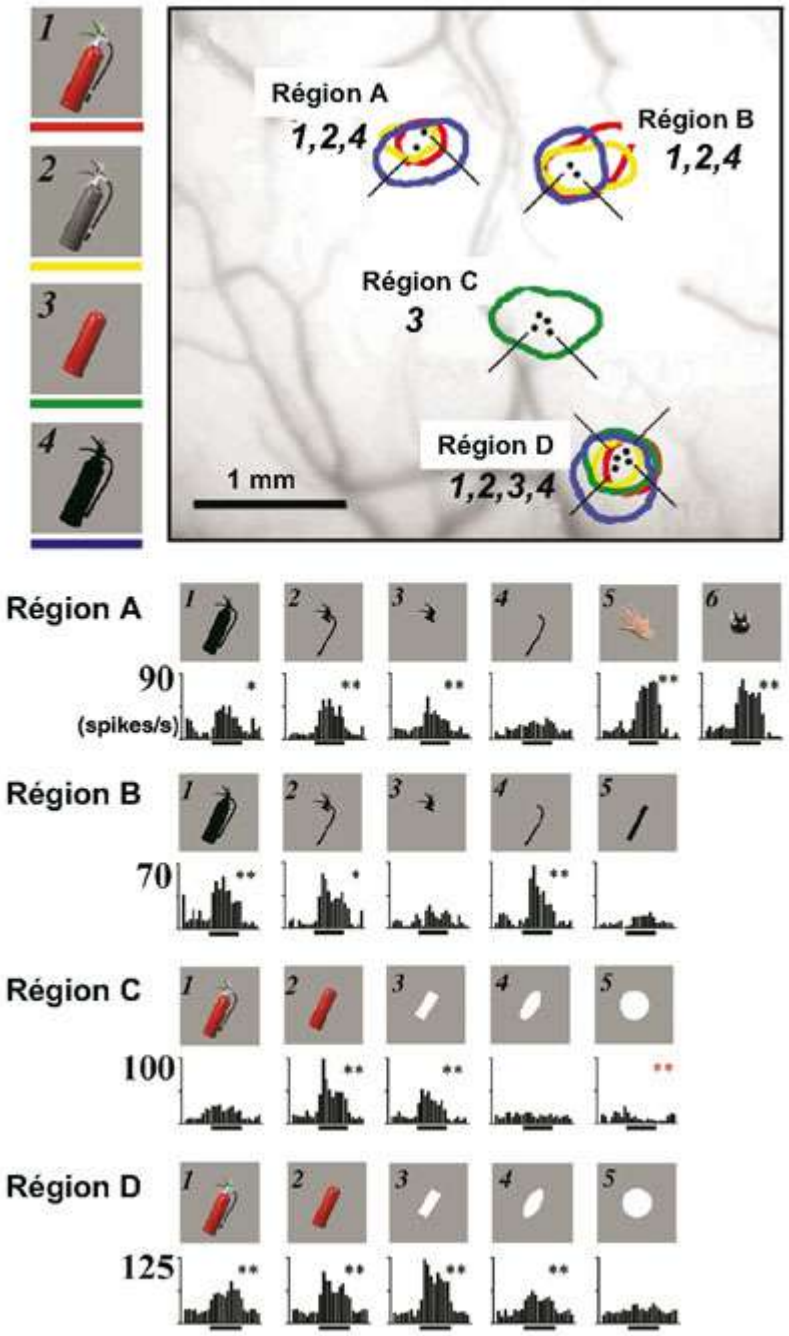


Figure 3.7 Un objet complexe est représenté dans le cortex temporal inférieur par une combinaison de colonnes de neurones. Manabu Tanifuji et ses collègues de l'institut Riken à Tokyo ont présenté à un singe anesthésié plusieurs images différentes d'un extincteur (en haut à gauche). Chaque image, numérotée de 1 à 4, active un ensemble discret de micro-régions au sein d'un secteur de quelques millimètres carrés de cortex. L'enregistrement de neurones uniques (en bas) dévoile le code associé à chaque microrégion. La région A répond à la poignée de l'extincteur et, en fait, à toute forme qui présente plusieurs pointes (doigts de la main, oreilles du chat). La région B répond à la forme en J du tuyau de l'extincteur. La région C répond à la forme allongée du corps de l'extincteur, mais seulement si elle n'est pas entourée de détails tels que le tuyau ou la poignée. La région D, enfin, répond à toute forme allongée et oblique. La combinaison de ces traits élémentaires définit précisément l'identité de l'objet (d'après Tsunoda et coll., 2001).

L’enregistrement de neurones uniques, à l’intérieur de chacune des taches ainsi repérées, révèle le code combinatoire sous-jacent. À l’un des sites, c’est la poignée de l’extincteur qui fait décharger les neurones – comme d’ailleurs, n’importe quelle forme en « V » composée de multiples pointes, par exemple le contour d’une main ou des oreilles d’un chat. À un autre endroit, les neurones répondent au tuyau seul – mais une ligne droite ne suffit pas, il faut que la forme soit courbée telle un « J ». Un troisième groupe de neurones est plus subtil encore. Il répond au corps de l’extincteur, comme d’ailleurs à toute forme allongée et vaguement rectangulaire –, mais il cesse de répondre lorsque ce rectangle est muni de détails supplémentaires tels qu’une poignée et un tuyau.

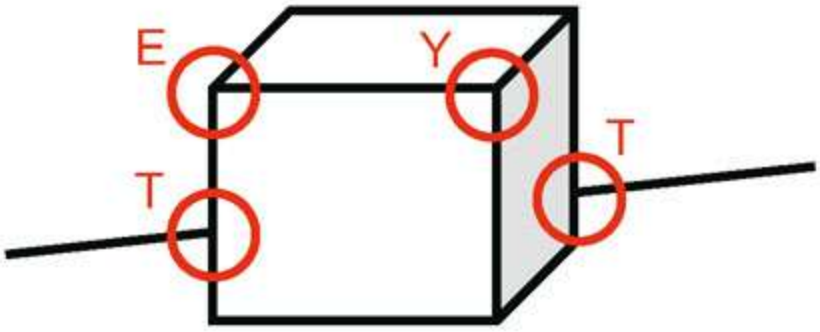
Ainsi commence à se dévoiler comment le cortex temporal parvient à coder, par la combinatoire d’un alphabet de formes élémentaires, n’importe quel objet vu par l’animal. Non seulement différents neurones sont sensibles aux différentes parties des objets, mais ils codent également pour leur agencement dans l’espace. Cette syntaxe combinatoire se retrouve à de multiples niveaux hiérarchiques du système visuel – seule l’échelle spatiale et le degré d’abstraction des propriétés visuelles augmentent progressivement. Ainsi, si l’aire visuelle primaire (V1) semble consacrée à la détection de traits, dès l’aire visuelle secondaire (V2) les neurones sont sensibles à la combinaison de deux lignes selon un angle déterminé[144]. Plus avant, dans la partie postérieure du cortex temporal inférieur (une aire appelée TEO), on trouve des neurones qui répondent à des combinaisons simples de morceaux de courbe[145]. Leur sélectivité pour des formes simples, par exemple un F, se réduit à la détection d’une conjonction de petits segments de courbe, chacun à sa place : la barre du haut, l’angle en haut à gauche, la petite barre du milieu, et ainsi de suite. En bref, le même schéma semble se répéter à de nombreux niveaux de la hiérarchie visuelle. À chaque étape, les neurones tirent leur sélectivité d’une conjonction de traits plus élémentaires codés par les neurones du niveau inférieur.

D’où viennent les protolettres ?

On ne peut qu’être frappé par la ressemblance des formes que préfèrent les neurones avec les lettres de l’alphabet, ou avec certains caractères chinois (figures 3.4 et 3.6). Certains neurones répondent ainsi à deux

disques superposés qui forment le symbole 8, d'autres à deux barres formant un T, d'autres encore à un astérisque, un rond, un J… D'où proviennent ces « protolettres » si profondément inscrites dans notre cerveau de primate ? Pourquoi constituent-elles l'image préférée de tant de neurones ? Par quel extraordinaire hasard ressemblent-elles si étroitement à l'alphabet que les Hébreux, les Grecs et les Romains nous ont transmis ? D'où provient ce mystérieux parallélisme entre ces deux mondes que l'on aurait supposés étanches – les profondeurs du cortex du singe et les surfaces de glaise, de roseau ou de parchemin sur lesquelles écrivaient les premiers scribes ?

S'agit-il d'une simple coïncidence ? Je ne le crois pas. Les formes que notre cortex s'est choisies pour représenter les objets ont probablement été sélectionnées, soit dans l'évolution des espèces, soit plus vraisemblablement au cours de l'apprentissage visuel propre à chaque individu, précisément parce qu'elles constituent un répertoire utile au codage de nombreuses scènes visuelles. La forme en T, par exemple, revient fréquemment dans les images naturelles. Dès qu'un objet en masque un autre, leurs contours se rencontrent presque toujours selon une jonction en T :



D'autres configurations caractéristiques, comme le Y ou le F, apparaissent lorsque plusieurs arrêtes se rejoignent en un même sommet. Les formes en J ou en 8 résultent d'autres combinaisons topologiques des bords de l'image. Tous ces éléments de forme font donc partie de ce que l'on appelle les « propriétés non accidentelles des objets ». On les appelle ainsi parce qu'il est très peu probable qu'on les observe par hasard, sans qu'un objet soit présent. Jetez des allumettes sur le sol et vous verrez qu'il

est très rare que deux d'entre elles se rejoignent précisément pour former un T. Il est encore moins probable que trois d'entre elles s'accolent pour former un Y. Autrement dit, si l'on observe ces formes sur la rétine, il y a de fortes chances qu'elles indiquent la présence d'un objet structuré.

Pourquoi le cortex juge-t-il utile de coder ces propriétés non accidentelles ? Parce que leur combinaison, propre à chaque objet, est souvent unique et invariante face aux changements de taille, de point de vue et d'éclairement. Faites tourner une tasse à café dans votre main et vous verrez que, sous la plupart des angles, l'anse rejoint la tasse selon deux jonctions en T, tandis que la lèvre de la tasse rejoint chacun des bords en formant deux autres jonctions en F (évidemment, l'angle exact formé par les contours varie). Il est difficile, même en fermant un œil, de trouver l'unique angle de vue selon lequel la lèvre et le bord de la tasse ne forment plus qu'un angle droit. Ainsi, dans de très nombreux cas, la liste des jonctions entre les arrêtes est *invariante* : elle suffit à caractériser un objet quelle que soit son orientation. On conçoit donc l'intérêt que le système nerveux peut trouver à repérer, le plus efficacement possible, ces invariants de forme.

Il existe encore bien d'autres propriétés non accidentelles des scènes visuelles. Le parallélisme en fait partie : il est très peu probable qu'une image contienne des segments parallèles par accident, sans que ces bords appartiennent à un objet tridimensionnel. D'autres invariants sont topologiques : si un objet contient un trou, il est probable que sa projection sur la rétine comprendra une courbe caractéristique en forme de « O ». Ces invariants sont si distinctifs qu'il semble que notre système nerveux les ait profondément internalisés. Selon le psychologue californien Irving Biederman, lorsque nous reconnaissons un objet, nous ne récupérons pas son image visuelle détaillée en mémoire. Notre cerveau se contente d'extraire de la rétine une esquisse fondée sur les propriétés non accidentelles et leurs relations topologiques et spatiales[146]. Leur extraction nous permet, dans un premier temps, de reconstituer les formes tridimensionnelles élémentaires constitutives de l'objet – surfaces, cônes, bâtons, etc. – et, dans un second temps, d'assembler ces éléments en une représentation complète de sa forme. L'intérêt d'un tel codage est de bien résister aux rotations, occlusions et autres dégradations de l'image.

À l’appui de sa thèse, Irving Biederman a montré que la perception humaine s’appuie plus sur les propriétés non accidentelles des objets que sur d’autres aspects de l’image. Par exemple, lorsque l’on efface la moitié des pixels d’une image, l’impact est très différent selon que l’on touche ou non aux propriétés non accidentelles :

— si l’on efface les segments qui relient deux propriétés non accidentelles, l’objet reste reconnaissable ;

— si, par contre, les propriétés non accidentelles elles-mêmes sont effacées, alors la reconnaissance devient impossible (figure 3.8)[147].

De même, lorsque nous devons décider si deux objets sont identiques ou différents, les différences sautent aux yeux lorsqu’elles concernent des propriétés non accidentelles (par exemple un « O » et un « 8 »), alors qu’elles sont plus difficiles à détecter lorsqu’elles n’affectent que les propriétés métriques de taille ou de distance (par exemple un « O » et un « o »)[148].

En collaboration avec le neurophysiologiste Rufin Vogels, Irving Biederman a également montré que de nombreux neurones du cortex temporal inférieur du singe macaque résistaient à des déformations métriques de l’image, à condition que ces transformations préservent les propriétés non accidentelles[149].

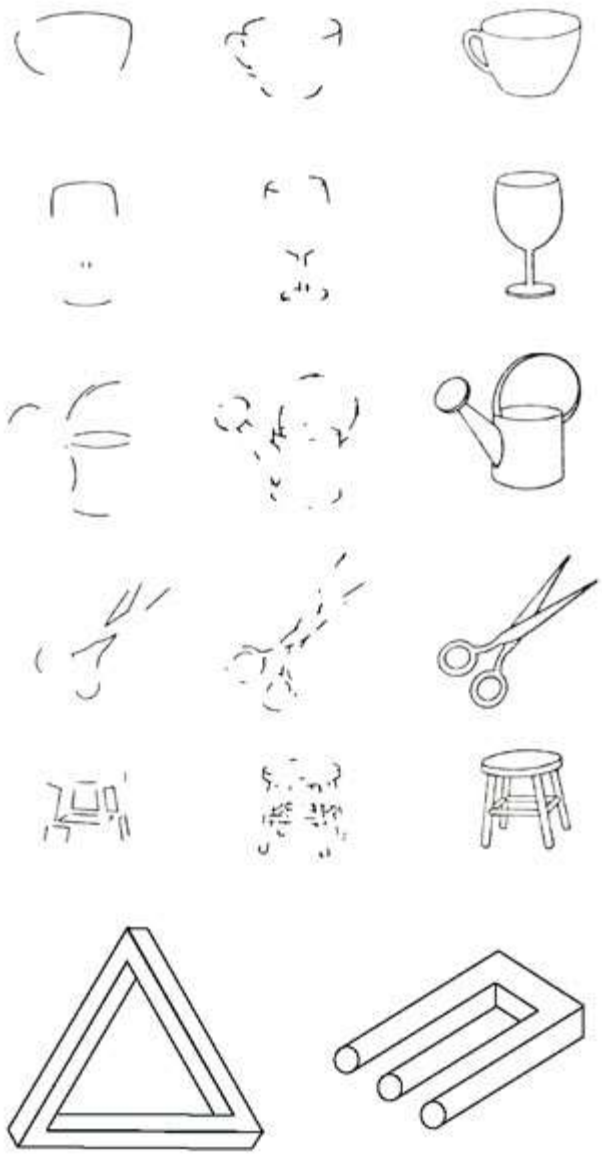


Figure 3.8 Les objets complexes sont reconnus principalement à partir des configurations que forment leurs contours. Les points de jonction entre ces contours, qui forment des configurations en T, en L, en E ou en F, jouent un rôle essentiel dans la reconnaissance visuelle. Lorsqu'on efface les jonctions, l'image devient difficile à reconnaître (colonne de gauche), alors que l'effacement d'une quantité équivalente de contours sans toucher aux jonctions pose moins de difficultés (colonne du milieu ; d'après Biederman, 1987). À l'inverse, dès que des jonctions sont présentes, même si elles ne forment pas un tout cohérent, notre système visuel ne peut s'empêcher de voir des objets, même s'ils sont physiquement impossibles (images du bas).

Ainsi, l'alphabet de formes que préfèrent ces neurones joue-t-il un rôle bien particulier : ces formes élémentaires, qui ressemblent souvent à nos lettres (T, F, Y, O), ont été adoptées par les neurones du cortex temporal inférieur du singe macaque parce qu'elles constituent un répertoire optimal, invariant aux transformations de l'image, et dont la combinatoire permet de représenter une infinité d'objets. Il est probable que d'autres formes

viennent s’y ajouter pour leur pertinence biologique. Par exemple, Tanaka a observé que certains neurones codent pour un point noir sur fond blanc, ou l’inverse. Ces neurones pourraient aider à la détection du regard et des visages, une compétence essentielle pour notre espèce. D’autres neurones semblent sensibles à la forme de la main ou des doigts. Dans l’ensemble, toutefois, le cortex temporal inférieur semble privilégier un alphabet de formes géométriquement simples, des invariants mathématiques que l’humanité n’a fait que redécouvrir, bien plus tard, lorsque des générations de scribes ont inventé l’écriture et l’alphabet.

L’apprentissage des formes

Nous venons de voir que la reconnaissance des objets repose sur un code combinatoire, un alphabet cortical de formes. Mais d’où provient cet alphabet lui-même ? Est-il inscrit dans les gènes ou résulte-t-il d’un apprentissage ?

Il n’est pas impossible que certaines formes soient tellement utiles à la reconnaissance visuelle qu’elles aient été internalisées au cours de l’évolution des espèces et soient maintenant précâblées dans notre système visuel. Les visages, les yeux, les jonctions en T pourraient faire partie d’un lexique inné de formes. D’un point de vue évolutif, elles conféreraient à l’organisme, dès la naissance, un immense avantage dans l’interaction rapide avec son environnement et son entourage.

Toutefois, il est difficile d’imaginer comment le génome humain, avec ses quelque 25 000 gènes seulement, pourrait contenir toutes les instructions détaillées nécessaires au précâblage de détecteurs de visages… ou d’extincteurs ! Au contraire, le cortex temporal inférieur possède des capacités avérées de plasticité et d’apprentissage. Il est donc probable que la majorité des neurones responsables de la reconnaissance des objets reçoivent leurs propriétés d’une interaction forte avec les images du monde extérieur, et donc d’un apprentissage. Au cours du développement de l’individu, et sans doute tout au long de la vie, chaque neurone ajusterait en permanence ses connexions aux objets perçus. Il sélectionnerait, parmi les dizaines de milliers de connexions synaptiques qu’il reçoit, celles qui réalisent des conjonctions qui permettent de coder les images les plus pertinentes pour l’organisme.

Il n’est certainement pas fortuit d’enseigner la lecture à cet âge si précoce où la plasticité atteint son pic. En immergeant les enfants dans un environnement artificiel fait des lettres et de mots, nous réorientons sans doute bon nombre de leurs neurones du cortex temporal inférieur afin qu’ils codent de façon optimale l’écriture. De nombreuses expériences ont effectivement montré que, lorsqu’un singe est entraîné à discriminer des objets nouveaux, de nombreux neurones se mettent progressivement à y répondre de façon préférentielle. Cela reste le cas, même lorsque les formes à reconnaître sont des fils de fer ou des fractales arbitraires très différentes de celles qu’un animal peut rencontrer dans le monde naturel[150]. Les neurones acquièrent cette sensibilité en apprenant à détecter des conjonctions notables de traits saillants.

Ainsi, Chris Baker, Marlene Behrmann et Carl Olson[151] ont-ils appris aux singes à reconnaître des sortes de « sceptres » dont les deux extrémités portaient des formes caractéristiques, par exemple un carré à un bout et un trident à l’autre. Après apprentissage, de nombreux neurones du cortex temporal se mettaient à répondre sélectivement à ces objets étranges. Lorsqu’on leur présentait chaque extrémité séparément, ils ne répondaient que faiblement. Leur réponse à l’image entière dépassait donc la simple somme des réponses à chacune des parties. C’est une preuve directe que les neurones peuvent apprendre à réagir à des conjonctions nouvelles. À l’intérieur de l’immense répertoire de formes possibles, seules celles que nous avons rencontrées par le passé sont représentées explicitement par des « neurones de conjonction ». Les autres combinaisons restent disponibles, mais à l’état de simple potentialité : tant que l’apprentissage n’a pas eu lieu, ces combinaisons ne sont pas rendues explicites par des neurones de niveau supérieur.

L’instinct d’apprendre

La plasticité cérébrale a été tant de fois démontrée qu’on la considère parfois comme une propriété qui va de soi : elle ferait partie des caractéristiques physiques intrinsèques du tissu cérébral, que n’importe quel neurone possède. En réalité, la capacité d’apprentissage doit plutôt être considérée comme une évolution sophistiquée du cortex. Dans certains circuits et à certains moments, l’organisme gagne à laisser une partie de son

système nerveux s’adapter aux contraintes du monde extérieur. C’est dans ces cas seulement que l’évolution a mis en place des mécanismes d’apprentissage. Il n’y a donc aucun paradoxe à parler de mécanismes rigides d’apprentissage, ou même d’« instinct d’apprendre », selon l’heureuse expression de Peter Marler[152]. Le vieil antagonisme entre l’inné et l’acquis est un leurre, puisque l’apprentissage lui-même repose sur une machinerie innée et rigide. De toute évidence, l’acquis s’appuie sur l’inné.

Le meilleur exemple des limites de la plasticité cérébrale est celui de la fusion des informations issues des deux yeux. Pendant l’enfance, des mécanismes génétiques rigides ouvrent, brièvement, une étroite fenêtre de plasticité dans le système visuel. Cette période, qui dure quelques semaines chez le chat, quelques mois chez les primates non humains et quelques années chez l’homme, autorise un ajustement fin des connexions de l’aire visuelle primaire afin d’aligner les informations issues de chaque œil. Durant cette période, les neurones apprennent à détecter l’apparition de la même image à des points suffisamment proches de l’œil gauche et de l’œil droit. À la fin de cette période critique, le circuit est figé. Les enfants qui louchent durant cette période critique perdent définitivement l’usage de la stéréopsie, c’est-à-dire l’exploitation du décalage des images issues des deux yeux pour voir en trois dimensions. L’inné n’ouvre la porte à l’acquis que pendant un instant.

La plasticité du cortex temporal inférieur qui nous permet d’apprendre de nouveaux objets n’est pas fondamentalement différente, même si elle s’étend tout au long de notre vie. Notre cortex temporal est programmé afin de mettre en relation, à tous les niveaux, les données sensorielles entre elles et de mémoriser les conjonctions qui en résultent. Ainsi l’identité d’un objet est vraisemblablement reconnue parce qu’elle crée une configuration unique de corrélations entre les cellules. La vision d’un extincteur, par exemple, allume simultanément plusieurs populations qui codent pour le corps, la poignée, le tuyau, la couleur rouge et bien d’autres primitives. Cette configuration reproductible d’activité est alors stockée et stabilisée par un accroissement de la force des synapses qui relient tous ces neurones. Bien entendu, à un niveau inférieur, chacune de ces primitives doit être à son tour reconnue comme une conjonction apprise de primitives plus simples. C’est donc un dispositif d’apprentissage hiérarchique et en cascade qui nous permet d’apprendre à reconnaître de nouveaux objets.

Au sommet de cette pyramide hiérarchique se pose un problème d'apprentissage particulier. À ce niveau élevé d'invariance, nous avons vu que les neurones répondent à de multiples vues du même objet, de face et de profil – voire, chez l'homme, au nom et à la photographie de la même personne (Jennifer Aniston). L'apprentissage de cette invariance ne peut plus s'expliquer par la simple mémorisation d'une configuration de neurones coactivés au même instant. En effet, il n'y a guère que dans les tableaux de Picasso que l'on voit simultanément le profil et le visage d'une même personne. Dans le monde naturel, ces différentes images se présentent à des instants différents. Comment un neurone peut-il donc apprendre à reconnaître qu'elles sont associées au même objet ? Yasushi Miyashita, de l'Université de Tokyo, a découvert un mécanisme neuronal plausible qui pourrait expliquer cet apprentissage. Il a montré que les neurones du cortex temporal inférieur sont sensibles aux corrélations temporelles[153]. Si l'on présente à l'animal des formes fractales qui n'ont aucun rapport entre elles, chacune d'elles se voit codée par une population distincte de neurones. Cependant, si ces formes sont associées dans le temps, soit parce qu'elles apparaissent de façon consécutive dans une liste, soit parce qu'elles sont présentées par paires, alors ces formes se voient fréquemment allouer les mêmes neurones. Ainsi, un même neurone finit-il par répondre à deux images complètement distinctes, dont le seul point commun est d'avoir été associées dans le temps (figure 3.9). En d'autres termes, la région temporale parvient à assembler et à représenter, par un même neurone, des conjonctions temporelles d'images arbitraires.

Un tel mécanisme suffit à engendrer des représentations invariantes d'un très haut degré d'abstraction. Lorsque nous rencontrons Jennifer Aniston, tandis que nous la voyons de près, de loin, de face ou de profil, nos neurones temporaux parviennent à maintenir d'elle une représentation stable. Ce mécanisme d'association arbitraire par corrélation temporelle pourrait jouer un rôle essentiel dans la lecture. À un bas niveau, il permet d'associer un « a » minuscule et un « A » majuscule, pour former un détecteur invariant de lettres. À un plus haut niveau, il organise la rencontre des lettres et des sons pour former la voie d'assemblage des graphèmes en phonèmes.

L’hypothèse du recyclage neuronal

En résumé, chez les primates, la vision n’est ni précâblée à la naissance ni livrée vierge de toute structure à l’empreinte du monde extérieur. L’architecture générale du système visuel est étroitement contrainte et reproductible, mais le détail des réponses de chaque neurone dépend des scènes visuelles qu’a précédemment rencontrées l’organisme. Des mécanismes sophistiqués d’apprentissage statistique détectent les régularités du monde extérieur. Notre cerveau est construit afin que certaines coïncidences suspectes – alignement de plusieurs barres sur la rétine, présence de jonction en T ou en L, séquences reproductibles d’images, etc. – soient extraites et internalisées dans l’architecture même des connexions du cortex temporal ventral.

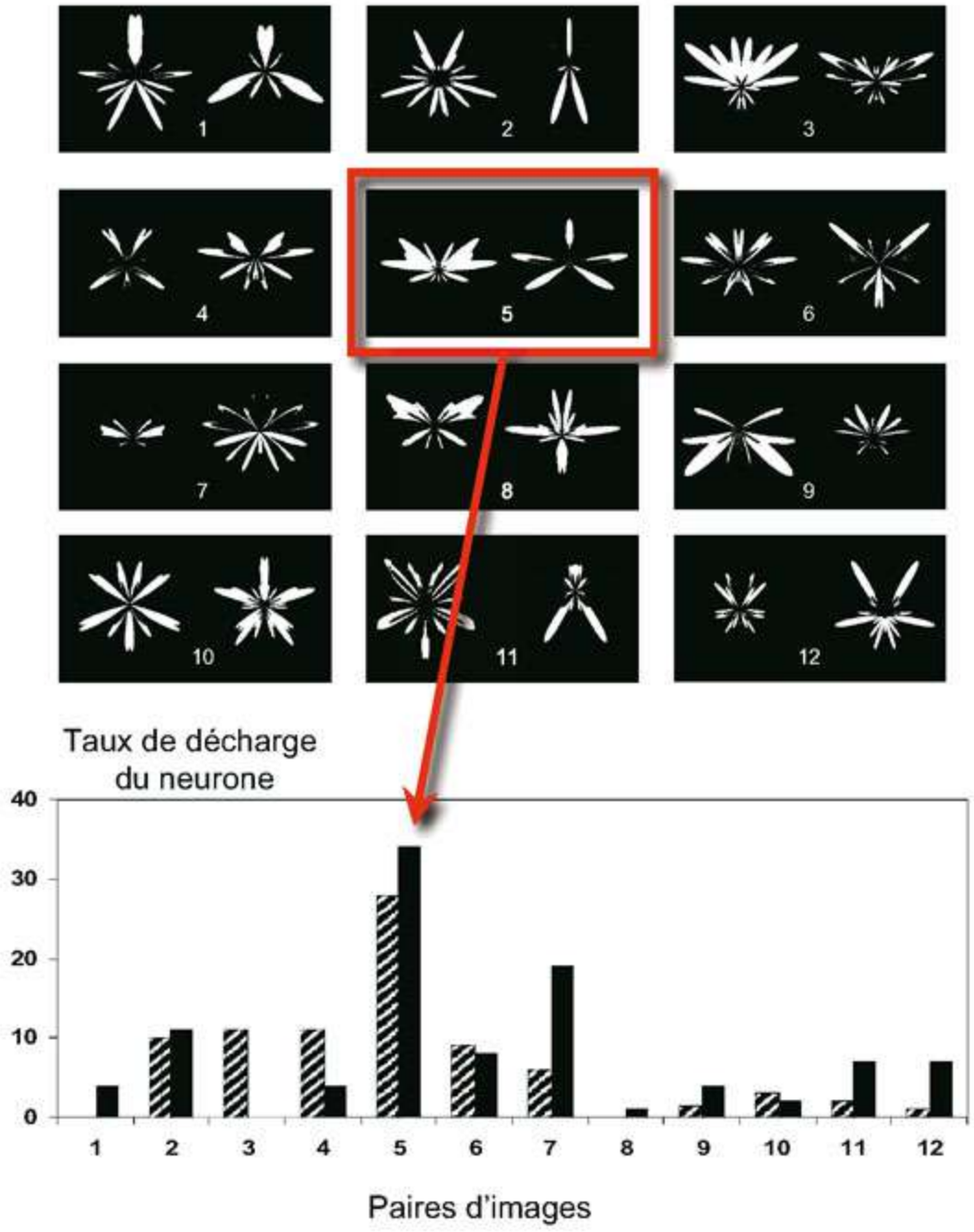


Figure 3.9 Les neurones du cortex inféro-temporal peuvent apprendre à répondre à des formes arbitraires. Sakai et Miyashita (1991) ont appris à des singes macaques à associer des images fractales en paires. Après l'apprentissage, un seul et même neurone répondait fréquemment aux deux membres de la paire – une association conventionnelle qui n'est pas sans rappeler le lien arbitraire entre lettres majuscules et minuscules (redessiné d'après Sakai & Miyashita, 1991).

Cette plasticité synaptique, qui se prolonge jusqu'à l'âge adulte, joue un rôle essentiel dans notre capacité d'apprendre à lire. C'est elle qui autorise une reconversion partielle de l'architecture du cortex visuel des primates au

cas particulier que pose la reconnaissance des lettres et des mots. Notre système visuel a hérité de son évolution juste assez de flexibilité pour se recycler en un cerveau de lecteur.

Le cerveau du jeune enfant, lorsqu'il arrive à l'école, est déjà préparé à la reconnaissance des lettres et des mots. Comme tous les primates, son cortex temporal ventral contient probablement un précurseur de l'alphabet. La reconnaissance des objets y fonctionne déjà selon un principe combinatoire, par recombinaison de vastes ensembles de neurones qui codent un alphabet de formes que j'ai appelées « protolettres », et dont bon nombre sont déjà très semblables à certaines de nos lettres.

Selon moi, ce n'est que grâce à cette préadaptation du cortex temporal inférieur des primates que nous parvenons à lire. Notre capacité à lire n'existe que parce que notre système visuel accomplit spontanément des opérations proches de celles nécessaires à la reconnaissance des mots, et parce qu'il est doté d'une frange de plasticité qui lui permet d'apprendre des formes nouvelles. Au cours de l'acquisition de la lecture, une partie de ce système parvient à se reconvertir à la reconnaissance invariante des lettres et des mots.

Notre cortex n'a donc rien d'une ardoise vierge ou d'une galette de cire qui enregistrerait fidèlement l'empreinte de toutes les inventions culturelles les plus arbitraires. Il n'est pas non plus un organe rigide qui, au cours de l'évolution, aurait dédié un « module » à la lecture. Il ressemble plutôt à un kit de bricolage ou une boîte de Meccano avec laquelle l'enfant peut fabriquer le modèle prévu par le marchand, mais également bricoler d'autres machines plus ou moins fonctionnelles.

Selon cette vision, nature et culture entretiennent des relations étroitement imbriquées. Notre histoire évolutive, par le biais de notre patrimoine génétique, spécifie une architecture cérébrale contrainte mais partiellement modifiable, qui délimite un espace d'objets culturels apprenables. De nouvelles inventions culturelles sont possibles, mais seulement dans la mesure où elles s'ajustent aux contraintes de l'architecture de notre cerveau et entrent dans son enveloppe de plasticité. Ces nouveaux objets de culture peuvent s'écarter considérablement des objets naturels au milieu desquels notre cerveau a évolué – rien, dans le monde naturel, ne ressemble à une page de texte. Mais ils doivent, au minimum, trouver leur « niche écologique » dans le cerveau : un circuit

dont le rôle initial est assez proche, et dont la flexibilité est suffisante pour être reconverti à ce nouvel usage.

Un concept darwinien classique vient à l'esprit : celui d'« exaptation[154] ». Ce terme, inventé par Steven Jay Gould, désigne la réutilisation, au cours de l'évolution des espèces, d'un mécanisme biologique ancien dans un rôle complètement différent de celui qu'il possédait initialement. Le plus bel exemple d'« exaptation » est peut-être celui des minuscules os qui, au plus profond de nos oreilles, semblent magnifiquement conçus pour l'amplification des signaux auditifs – alors qu'en réalité, ils sont issus de l'ossature de la mâchoire !

Dans un article célèbre, François Jacob envisage l'évolution comme un bricoleur inventif qui accumule dans son garage un bric-à-brac de planches, de ferrailles ou de rouages, et les assemble pour former une machine nouvelle[155]. Selon mon hypothèse, l'invention culturelle relève d'un mécanisme similaire : la cooptation de circuits neuronaux anciens et leur recombinaison en objets culturels chimériques utiles à une société humaine, ou tout simplement stables et reproductibles en son sein.

Dans le cas des objets culturels, toutefois, le bricolage survient à une vitesse bien plus grande que celle de l'évolution biologique. Leur invention ne prend que quelques semaines ou quelques mois (même s'il peut s'écouler ensuite plusieurs générations avant que l'invention ne se répande à toute la population). De plus, la création de nouveaux objets culturels repose sur des mécanismes neuronaux d'apprentissage qui ne nécessitent aucun changement du génome. C'est en raison de ces différences fondamentales entre évolution biologique et évolution culturelle qu'il me paraît utile, pour caractériser l'interface entre objets de culture et réseaux de neurones, d'introduire un terme nouveau, celui de « recyclage neuronal ».

J'entends par ce terme l'invasion partielle ou totale, par un objet culturel nouveau, de territoires corticaux initialement dévolus à une fonction différente. Le mot évoque un changement de fonction à l'échelle de quelques mois, par exemple lorsqu'une personne se recycle en vue d'apprendre un nouveau métier adapté à l'évolution du marché du travail. Le recyclage neuronal est une reconversion : il transforme une fonction qui, autrefois, avait son utilité dans notre passé évolutif, en une fonction nouvelle plus utile dans le contexte culturel présent.

Le mot « recyclage » souligne également que le tissu neuronal qui permet l'apprentissage ne se comporte pas comme une ardoise vierge. Au contraire, il possède des propriétés intrinsèques qui le rendent plus ou moins approprié au nouvel usage que l'on souhaite en faire. On ne peut pas produire n'importe quel objet à partir de verre ou de papier recyclé. Ces matériaux possèdent des propriétés physiques intrinsèques qui les rendent propres à certains usages. De la même manière, chaque région corticale, par sa connectivité, sa plasticité, ses biais génétiques initiaux, possède des propriétés adaptées à sa fonction. Selon le modèle du recyclage neuronal, l'apprentissage culturel ne renverse jamais totalement ces biais. Il les détourne de façon minimale afin qu'ils puissent remplir un rôle nouveau. Ainsi devons-nous nous attendre à ce que les objets culturels ne soient pas infiniment malléables, mais reflètent les contraintes intrinsèques du matériau neuronal dont ils sont issus.

La naissance d'une culture

Le recyclage neuronal joue un rôle essentiel dans la stabilisation de ce que nous appelons la culture, c'est-à-dire l'ensemble des représentations mentales partagées qui caractérisent un groupe d'humains. Selon l'évolutionniste Richard Dawkins, de la même manière que la reproduction propage les gènes, la transmission d'informations culturelles d'un individu à l'autre propage des « mêmes », des briques de base de la culture qui peuvent aller de la recette de la crêpe Suzette à des composants plus fondamentaux tels que l'écriture ou la religion[156]. Susan Blackmore, qui s'est faite apôtre de cette idée, parle du cerveau humain comme d'une « machine à mêmes »[157]. Mais le modèle « mémétique » est caricatural, comme le souligne volontiers l'anthropologue français Dan Sperber[158]. Essentiellement lamarckien, il suppose que l'enfant ne fait qu'imiter son entourage avec une fidélité suffisante pour assurer la réplication des mêmes et leur stabilité culturelle à l'échelle de dizaines ou de centaines d'années. Toutefois, cette hypothèse d'une imitation passive ne résiste pas à l'analyse. Le cerveau ne se contente pas de copier ce qui l'entoure à la manière d'une cire vierge. Il dispose plutôt d'une marge de plasticité au sein de structures fortement contraintes et va donc sélectionner, selon un mode darwinien, certaines des représentations culturelles qui l'environnent. L'hypothèse du

recyclage neuronal conduit naturellement à postuler l'existence d'« attracteurs culturels » qui expliquent la reproductibilité des traits majeurs des cultures humaines, et empêchent la dérive qui ne manquerait pas de se produire si les humains ne faisaient que copier leurs voisins.

La sélection culturelle est amplifiée, dans l'espèce humaine, par son caractère intentionnel. Comme le souligne le primatologue David Premack, *Homo sapiens* est le seul primate capable de pédagogie, dans la mesure où lui seul sait prêter attention aux connaissances et aux états mentaux d'autrui à des fins d'enseignement. Non seulement nous transmettons activement les objets culturels que nous jugeons utiles, mais – et cela est particulièrement évident dans le cas de l'écriture – nous les perfectionnons intentionnellement. Voici plus de cinq mille ans, les premiers scribes découvrirent un pouvoir caché du cerveau humain, celui d'apprendre à transmettre le langage par les yeux. Une longue chaîne de transmission intentionnelle nous relie à ces premiers inventeurs qui ont œuvré sans relâche, génération après génération, afin de rendre cette invention plus facile à apprendre par notre système visuel de primate.

En définitive, selon Dan Sperber, la propagation d'une invention culturelle s'apparente plus à une épidémie qu'à une imitation. Une immense gamme de représentations culturelles nous sollicite en permanence, un peu comme des virus. Seules certaines prennent souche dans la population, parce qu'elles trouvent une résonance dans notre cerveau, exactement comme un virus mutant trouve une brèche dans les défenses de l'organisme. Nous propageons alors ces inventions nouvelles d'individu à individu, de façon active et non passive, intentionnellement, et à une vitesse record rendue possible par une pédagogie efficace. Les représentations gagnantes sont celles qui trouvent, à l'intérieur de l'architecture du cerveau humain, des circuits susceptibles d'un recyclage neuronal efficace, de sorte qu'elles s'intègrent vite, et pour longtemps, au sein de la mémoire.

Lorsque cela se produit, un trait culturel peut se propager rapidement jusqu'à envahir tout un groupe humain. On entre alors dans une période de stabilité culturelle, jusqu'à ce qu'une nouvelle invention voie le jour et déplace à nouveau l'équilibre. C'est ainsi que naissent, se propagent et meurent les cultures.

Nous verrons dans un instant que l'analogie d'une « épidémie culturelle » s'applique bien à l'invention de l'écriture, avec son foyer

primaire dans l’antique Sumer, d’autres foyers en Chine et en Amérique du Sud, et une propagation sélective avec de longues périodes de stase, de brusques accélérations et des mutations. Selon le modèle proposé, si la lecture parvient à prendre ainsi possession de notre cerveau, jusqu’à devenir un trait essentiel de notre culture « lettrée », c’est qu’elle possède une niche cérébrale dans la région occipito-temporale ventrale. La capacité de cette région à reconnaître les mots résulte d’une double évolution :

— au cours de la phylogenèse, donc à l’échelle de millions d’années, évolution de cette région corticale pour la reconnaissance invariante des objets visuels ;

— au cours de notre histoire culturelle des cinq derniers milliers d’années, évolution des écritures afin de s’adapter, le plus étroitement possible, à cette niche corticale.

Dans cette hypothèse, le cortex occipito-temporal n’a évolué que pour apprendre à reconnaître les formes naturelles, mais cette évolution l’a doté d’une plasticité telle qu’il parvient à se recycler pour devenir un spécialiste du mot écrit. Les formes élémentaires que cette région est capable de représenter ont été découvertes et exploitées par nos systèmes d’écriture.

Ce n’est donc pas notre cortex qui a évolué pour la lecture – il n’y avait ni le temps ni la pression sélective suffisants. Ce sont, au contraire, les systèmes d’écriture eux-mêmes qui ont évolué sous la contrainte d’être aisés à reconnaître et à apprendre par notre cerveau de primate.

Les neurones d’un lecteur

Si l’on admet que l’apprentissage de la lecture reconvertit des réseaux de neurones initialement dédiés à la reconnaissance visuelle des objets, il nous reste à comprendre, dans le détail, comment ces neurones peuvent se réorganiser pour reconnaître, en quelques dizaines de millisecondes, un mot écrit. Chez un bon lecteur, quel type de « code neural » est inscrit dans l’aire de la forme visuelle des mots ? Existe-t-il des neurones spécialisés pour chaque lettre ? Pour chaque syllabe ? Pour chaque mot ? Comment sont-ils organisés dans l’espace du cortex ?

La géographie détaillée des neurones du lecteur reste à découvrir. Les techniques actuelles d’imagerie ne permettent pas de descendre à l’échelle minuscule du neurone. Toutefois, notre connaissance du système visuel des

autres primates, à l'échelle cellulaire, est telle que l'on peut d'ores et déjà avancer, avec prudence, quelques spéculations sur le code neural de la lecture. Même si de tels modèles théoriques restent souvent bien en deçà de la complexité réelle du système nerveux, ils peuvent servir de guides à la recherche et motiver l'invention de nouvelles techniques. C'est dans cet esprit qu'avec mes collègues Laurent Cohen, Mariano Sigman et Fabien Vinckier, j'ai proposé un schéma synthétique de l'architecture des neurones de la lecture (figure 3.10)[159].

Ce modèle part du principe que le système visuel ventral est organisé, chez tous les primates, sous forme d'une hiérarchie d'aires cérébrales depuis le pôle occipital jusqu'aux régions temporales antérieures. Comme je l'ai expliqué plus haut, d'étape en étape la taille des champs récepteurs augmente d'un facteur 2 ou 3, tandis que s'accroît la complexité des images auxquelles les neurones répondent, ainsi que leur capacité d'invariance pour la taille et la position.

Essayons maintenant d'imaginer ce que deviendrait cette architecture neuronale si elle était bombardée, plusieurs heures par jour, par des milliers de mots écrits, et si elle tentait d'en extraire les régularités les plus saillantes. Au plus bas niveau, celui de l'aire visuelle primaire V1, la plupart des neurones répondent à de simples traits. Comme l'ont découvert les prix Nobel David Hubel et Torsten Wiesel[160], chaque neurone, à l'intérieur de la toute petite zone rétinienne qu'il examine, préfère voir une petite barre plus que tout autre stimulus. Les lettres et les mots étant constitués de tels traits, nous faisons l'hypothèse que l'expérience de la lecture ne modifie pas fondamentalement ce codage primitif. L'essentiel du recyclage ne se situe pas à ce niveau, mais plus en aval, dans les régions qui codent pour des propriétés plus abstraites de la scène visuelle. Toutefois, on ne peut exclure que la précision du codage visuel de bas niveau soit augmentée chez le bon lecteur, et que certaines formes récurrentes comme les T et les X soient déjà repérées à ce niveau. Même chez l'homme adulte, en effet, l'apprentissage intensif reste capable de modifier l'organisation des aires visuelles les plus précoces[161].

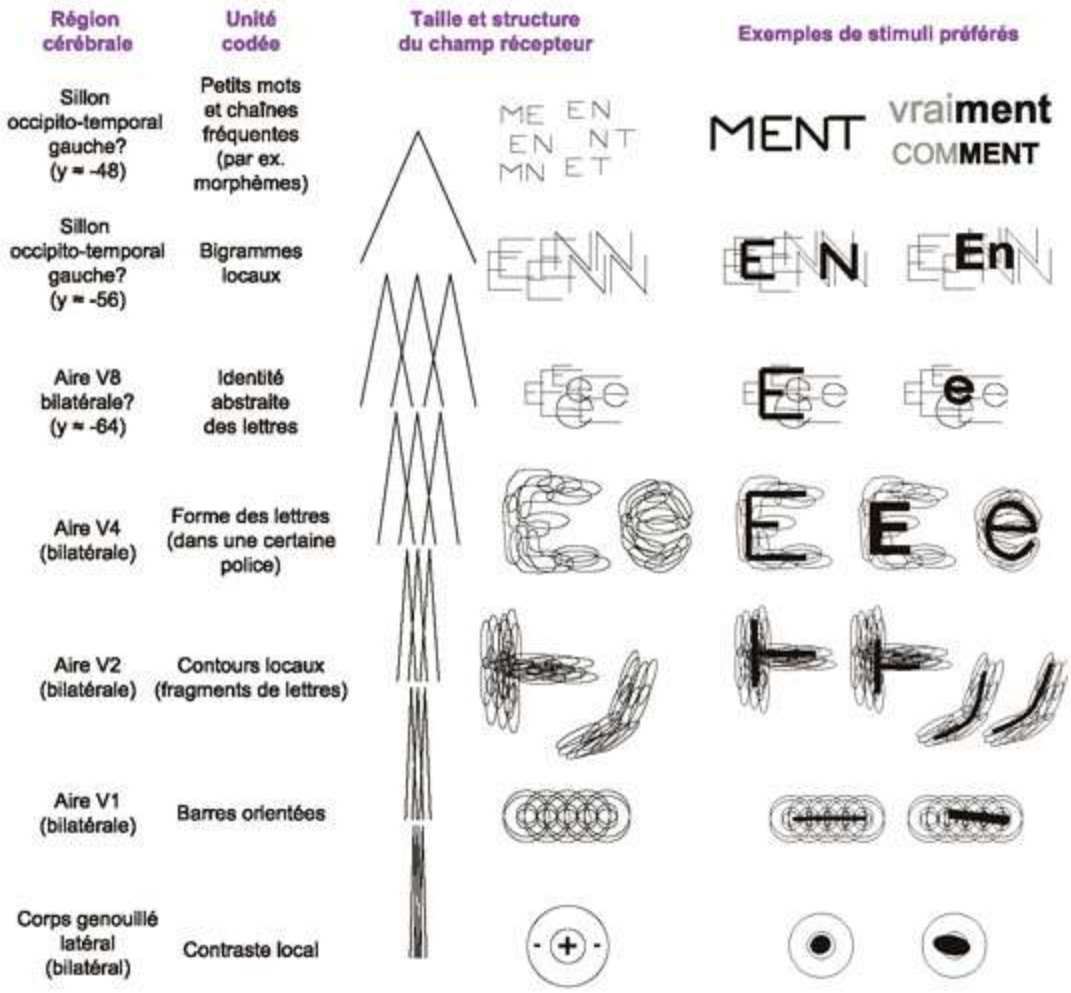


Figure 3.10 Un modèle hypothétique de la hiérarchie neuronale qui permet la reconnaissance des mots. À chaque niveau, les neurones apprennent à reconnaître une conjonction de réponses des neurones du niveau immédiatement inférieur. Tout en bas de la pyramide figurent des neurones détecteurs de contraste, de barres et de contours, qui sont partagés avec la reconnaissance des images. À mesure que l'on s'élève dans la hiérarchie des aires corticales apparaissent des neurones de plus en plus spécialisés pour la lecture : lettres, paires de lettres (bigrammes), puis morphèmes et petits mots. À chaque étape, le champ récepteur s'élargit d'un facteur 2 ou 3, et la réponse neuronale devient de moins en moins dépendante de la position et des caractéristiques visuelles du stimulus (d'après Dehaene et coll., 2005).

La majorité des formes de lettres sont probablement extraites un peu plus avant dans la hiérarchie visuelle, par les neurones des aires V2 et V4. En combinant plusieurs barres orientées, les neurones de l'aire V2 parviennent à former des détecteurs élémentaires de contours. À l'étape suivante, l'aire V4, ces « combinaisons de combinaisons » parviennent à représenter des formes simples, dont probablement celles des lettres. Avant même l'apprentissage de la lecture, de nombreux neurones codent déjà pour des formes en T, L, Y ou X qui caractérisent les jonctions entre les contours

des objets du monde naturel. À partir de cet alphabet de formes, reconnaître les autres lettres n'est probablement pas très difficile. Il est possible que cet apprentissage commence dans les aires plus antérieures du cortex temporal ventral, où Tanaka observe les colonnes corticales codant pour des formes élémentaires chez le primate, et qu'il recule progressivement vers les aires les plus précoces à mesure que la lecture s'automatise et que nous devenons capables de discriminer de toutes petites lettres[162].

Si les neurones de V4 reconnaissent une conjonction de courbes, il est probable qu'ils ne puissent représenter qu'un seul contour, autrement dit une seule forme. Ainsi les différentes formes d'une même lettre, minuscule et majuscule, activent-elles initialement des populations de neurones différentes. Ce n'est qu'à l'étape suivante, en combinant l'activation de tels détecteurs, que le système visuel parvient à coder l'identité abstraite des lettres, indépendamment de leur casse. Mes collègues et moi postulons que cette étape cruciale, qui nécessite un apprentissage culturel, s'effectue dans l'aire visuelle V8, dans les deux hémisphères, à l'endroit du cortex où nos expériences d'imagerie ont montré une capacité de détecter la répétition de lettres écrites en majuscules ou en minuscules.

Souvenez-vous qu'à chaque étape, les neurones gagnent en invariance spatiale. En combinant les réponses de nombreux détecteurs dont les champs récepteurs sont légèrement différents, ils deviennent progressivement insensibles au déplacement ou au changement de taille de leur forme préférée (figure 3.10, colonne de droite). Toutefois, au niveau de l'aire V8, les champs récepteurs restent étroits et l'invariance ne s'étend donc pas encore à l'ensemble de la rétine. Les détecteurs de lettres doivent donc être répliqués à chacune des positions où des lettres sont susceptibles d'apparaître au cours de la lecture. Il existe probablement plusieurs dizaines de détecteurs de la lettre « A », qui ne répondent que si leur lettre favorite occupe une position rétinienne particulière.

Les neurones bigrammes

Quelle est l'étape suivante ? En combinant des neurones sensibles aux lettres, on doit obtenir des cellules sensibles à des conjonctions de plusieurs lettres. Un neurone pourrait, par exemple, signaler la présence de la lettre « E », une ou deux lettres à gauche de la lettre « N ». En suivant toujours la

règle simple d'une multiplication par deux ou trois du champ récepteur, on pourrait s'attendre à ce que les neurones codent pour des groupes d'une, deux ou trois lettres. Cependant, le système nerveux doit trouver un compromis entre l'invariance, la sélectivité et la nécessité de maximiser la quantité d'information véhiculée par chaque neurone. Un neurone qui répondrait à un triplet de lettres ne pourrait le faire, à ce stade, qu'à une position unique. Il ne véhiculerait donc qu'une information très étroite, utile pour quelques mots seulement – peut-être les plus fréquents des mots grammaticaux, tels que « les », « ils » ou « est », sont-ils codés ainsi ? Inversement, un neurone qui ne coderait que la présence d'une seule lettre à trois endroits possibles serait souvent activé, mais perdrait toute information sur la position de la lettre.

C'est pourquoi mon modèle postule que la combinaison de lettres la plus utile à détecter à cette étape du traitement visuel est le bigramme – une paire ordonnée de lettres, par exemple « E » à gauche de « N ». Il prédit donc l'existence de neurones très particuliers, les « neurones bigrammes », qui devraient présenter la curieuse particularité de répondre à tous les mots qui contiennent une certaine paire de lettres.

Il est facile de câbler un neurone afin qu'il détecte sélectivement une telle paire de lettres, tout en montrant une certaine tolérance pour leur position exacte. Comme le montre la figure 3.10, il suffit de collecter les réponses de deux ensembles de neurones, certains spécialisés pour la détection de la lettre « E », et d'autres pour la lettre « N ». La sensibilité à l'ordre des lettres s'obtient en s'arrangeant pour que les neurones qui détectent « E » aient des champs récepteurs situés à gauche de ceux qui détectent les « N ». Le résultat est un neurone détecteur du bigramme « EN », qui montre une invariance de position plus grande que celle de chacun des détecteurs de lettres sur lesquels il repose.

S'ils fonctionnent ainsi, les neurones bigrammes devraient posséder une propriété curieuse : ils devraient tolérer la présence de quelques lettres quelconques entre les deux lettres qu'ils préfèrent. Ainsi, le détecteur du bigramme « EN » répondrait-il aux mots « **en**tre » ou « m**en**t » mais aussi « s**ei**n » ou « c**er**n**e** », dans lesquels une lettre intruse s'est glissée entre le « e » et le « n ». Pourquoi cette tolérance ? Elle résulte simplement de la structure des champs récepteurs. Pour tolérer de petits déplacements du mot, les neurones bigrammes doivent collecter les réponses d'une gamme

étendue de neurones lettres du niveau inférieur, dont les champs récepteurs s'étalent sur toute une portion de la rétine. Rien n'empêche alors une ou plusieurs lettres intermédiaires de s'insérer dans la paire. On parle d'un détecteur de « bigramme ouvert ».

Personne n'a encore observé de neurones bigrammes – ce ne sont que de pures constructions théoriques qui ne pourront être mises directement à l'épreuve que lorsque nos méthodes d'imagerie auront considérablement progressé. Leur existence est, pour l'instant, aussi hypothétique que celle du neutrino, cette particule dont Pauli avait postulé l'existence dès 1930 tout en notant qu'elle était, en principe, essentiellement impossible à détecter (elle ne le sera que vingt-six ans plus tard). Quel intérêt, me direz-vous, à avancer de telles propositions théoriques si elles demeurent invérifiables ? C'est qu'il arrive parfois, dans la construction d'un modèle, des moments heureux où, à l'instant même où l'échafaudage théorique paraît le plus audacieux, le plus chancelant peut-être, se dégage soudain une conséquence inattendue qui reprend contact avec la réalité expérimentale.

En l'occurrence, il se trouve que, par une voie totalement indépendante, deux chercheurs en psychologie, Jonathan Grainger et Carol Whitney, ont été amenés à postuler que les mots sont codés par bigrammes[163]. Ces chercheurs étaient uniquement à la recherche d'un code abstrait qui pourrait expliquer les mesures de similarité entre les mots. Pourtant, leurs conclusions s'accordent étroitement avec celles de mon modèle. Comme le neutrino, l'objet théorique qu'est le neurone bigramme pourrait donc expliquer bon nombre d'énigmes et jeter un premier pont entre deux disciplines jusqu'ici disjointes, la neurophysiologie et la psychologie de la lecture.

Quelles sont donc les observations de Grainger et Whitney ? Il s'agit d'expériences d'amorçage, dans lesquelles on examine si la présentation d'une première chaîne de caractères facilite la lecture d'une seconde. Par exemple, le fait de voir le stimulus « jardin » facilite la lecture ultérieure de « JARDIN », ce qui indique que ces chaînes partagent le même code (une représentation abstraite commune aux minuscules et aux majuscules). Cependant, plusieurs chercheurs ont observé qu'il n'était pas nécessaire de répéter toutes les lettres pour obtenir une facilitation. On sait, par exemple, que la présentation d'une amorce partielle telle que « jrdn », facilite tout autant la lecture ultérieure du mot « jardin » – alors qu'une amorce aux

lettres mélangées ou insérées, telle que « jtrdvn », « jdrn » ou « dnjr », n'a aucun effet[164]. Cela signifie que les chaînes « jrdn » et « jardin », à une certaine étape du traitement visuel, partagent le même code.

D'autres expériences ont montré que ce code résiste partiellement à la transposition locale de deux lettres. Ainsi la chaîne « bagde » facilite-t-elle la lecture du mot « badge » pratiquement autant que la répétition à l'identique du même mot[165]. Peut-être, d'ailleurs, n'aviez-vous pas perçu la transposition des lettres dans « bagde » ? Ces effets de similarité abstraite sont si puissants que l'on puet mmêe lrie des parhess etnèiers dnas lsequllees les ltteers de cahucn des mtos ont été mlénaéegs de pocrhe en prchoe, suaf la pmerèrie et la drneèire.

Quel code résisterait à une telle salade de lettres ? C'est en réfléchissant à cette question que Jonathan Grainger et Carol Whitney en sont venus à proposer que le système visuel des lecteurs code la position *relative* des lettres, et qu'il le fait en repérant les bigrammes. De fait, leurs observations expérimentales posent un sérieux problème aux modèles les plus courants de la lecture, qui postulent que l'entrée visuelle est codée par un simple tableau qui donne la position absolue des lettres sur la rétine[166]. Dans ce cas, il ne devrait pas y avoir plus de ressemblance entre « bagde » et « badge » qu'entre « barte » et « badge » : dans tous les cas, deux lettres sur cinq diffèrent. Grainger et Whitney font remarquer que les choses seraient bien différentes si chaque mot était codé, non pas par la liste de ses lettres, mais par la liste de ses paires ordonnées de lettres. Le mot « badge » serait ainsi codé par une liste de dix bigrammes : BA, BD, BG, BE, AD, AG, AE, DG, DE et GE. En transposant deux lettres consécutives, comme dans « bagde », un seul de ces bigrammes change (DG devient GD), mais 90 % du code reste le même. Cette similarité du code expliquerait que l'on continue à lire le mot « bagde » dont les lettres sont transposées. Lorsqu'on insère des lettres inappropriées, le code change bien plus : la chaîne de lettres « barte » ne possède que 30 % de bigrammes communs avec « badge », ce qui explique qu'elle ne soit pas capable d'amorcer ce mot. On voit également que, pour préserver le code, mieux vaut transposer ou effacer des lettres qu'en ajouter de fausses. Tous les bigrammes de la chaîne « jrdn » sont partagés avec ceux du mot « jardin », alors que moins de la moitié de ceux de « jtrdvn » sont compatibles avec ce même mot. La résistance du codage par bigrammes à l'effacement partiel et à la transposition rend bien compte

de ntr cpaaicté de lrie des prhsaes dnas lseqeulels la psoittoin des ltteres est mdofiéie.

Autre avantage du codage par bigrammes : il est entièrement insensible aux changements de position et de taille. Vous pouvez déplacer ou agrandir le mot « badge », le « b » restera toujours à gauche du « d », et le « d » à gauche du « e ». Autrement dit, la liste des bigrammes ne dépend absolument pas de la position absolue des lettres. L'invariance de position y est garantie par la structure même du code employé.

Sur la base de tous ces arguments, Grainger et Whitney ont proposé que les mots écrits soient codés par la liste exhaustive de leurs bigrammes. Toutefois, ce code formel se heurte à quelques difficultés. D'abord, il prédit qu'il devrait être facile de lire des mots dont les l e t t r e s s o n t e s p a c é e s, même de façon i rr é g ul i è r e. En effet, cette transformation préserve les bigrammes et rend même plus saillant l'ordre de leurs lettres – et pourtant ces chaînes sont difficiles à lire. Autre problème, la liste des bigrammes n'est pas dépourvue d'ambiguïté : elle n'assigne pas nécessairement un code différent à chaque mot. Les mots « nana » et « anna », par exemple, ont exactement la même liste de bigrammes : AA, NN, AN et NA. Il en va de même pour « isis » et « sissi », et bien d'autres mots dont les lettres sont répétées. Si nous ne codions que les bigrammes, ne devrions-nous pas être structurellement incapables de distinguer ces mots ? Pire encore, des orthographes improbables comme « naananan » ne devraient-elles pas être acceptables, dans la mesure où elles ont exactement la même liste de bigrammes que le mot « anna » ?

C'est ici que l'implémentation neuronale vient en aide au modèle purement formel de Grainger et Whitney. Les neurones bigrammes ne répondent pas à leur paire de lettres favorite n'importe où sur la rétine. Ce sont des détecteurs locaux, qui ont un champ récepteur bien défini, et qui conservent nécessairement une certaine sélectivité spatiale – ce qui implique qu'ils soient répliqués en divers points du champ visuel. Ainsi, certains détecteurs réagiront à la présence de « na » au début de « nana », mais ne déchargeront pas si le stimulus est « anna » : même si les lettres « na » sont présentes dans le bon ordre, elles ne tombent pas dans le champ récepteur des mêmes neurones. Ainsi, le modèle neuronal hiérarchique parvient-il à assigner un code unique à chaque mot.

L’hypothèse de détecteurs locaux de bigrammes explique également que l’on ne puisse pas écarter les lettres sans briser la reconnaissance visuelle rapide des mots. Selon la règle d’un accroissement d’un facteur 2 ou 3 du champ récepteur à chaque étape, les détecteurs de bigrammes ne peuvent tolérer qu’un déplacement de deux ou trois positions des lettres qui les composent (voir la figure 3.10). Autrement dit, un neurone bigramme ne peut répondre à une paire de lettres que si la lettre de gauche ne s’éloigne pas de plus de deux caractères de celle de droite. Par exemple, un neurone sensible à la paire « EN » répondrait aux mots « **en** », « **et**n**a** » et « **é**la**n** », mais pas à « **é**cra**n** » ni à « **e**spio**n** ».

Il en découle une prédiction très simple : s’il l’on e s p a c e les lettres qui composent un mot, le code neural doit résister à un espacement faible, puis s’écrouler brutalement dès qu’il excède deux caractères. Fabien Vinckier, Laurent Cohen et moi-même avons vérifié empiriquement cette règle. Aussitôt que l’espace entre les lettres dépasse deux caractères, la lecture des mots cesse brutalement d’être rapide et parallèle[167]. Testez vous-même cette prédiction en essayant de lire ce petit texte où l’espacement des lettres augmente progressivement. Pour l’i n s t a n t, la l e c t u r e reste facile. B i e n que la présentation soit i n h a b i t u e l l e, v o s d é t e c t e u r s d e b i g r a m m e s tolèrent aisément un espace de la taille d’une lettre, ou même d’une lettre et d e m i e. M a i s, d è s q u e l ’ e s p a c e m e n t d é p a s s e d e u x l e t t r e s, v o s p e r f o r m a n c e s s ’ e f f o n d r e n t, la l e c t u r e r a p i d e d e v i e n t i m p o s s i b l e e t v o u s v o u s r e t r o u v e z d a n s la p e a u d ’ u n l e c t e u r d é b u t a n t – v o t r e v o i e t e m p o r a l e v e n t r a l e n e r é p o n d p l u s !

L’arborescence neuronale des mots

Admettons qu'il existe des neurones détecteurs de bigrammes. À quoi devraient alors répondre les neurones de l'étape suivante ? Tout naturellement, à des combinaisons de combinaisons de lettres – autrement dit, à de petites chaînes de trois à cinq lettres qui reviennent fréquemment dans la langue écrite. Ces neurones répondront donc à de petits mots (« mais », « sont », « dans »), des graphèmes complexes (« eau », « eux »), des syllabes fréquentes (« teau », « com »), mais également des racines qui reviennent souvent (« mang- », « proch- »), des préfixes (« anti- », « pré- ») ou des suffixes (« -ions », « -ent », « -tion »). Autrement dit, on s'attend à voir émerger, à ce niveau, au milieu d'un vaste ensemble d'unités visuelles, un codage neural des morphèmes, les plus petites unités de sens que contiennent les mots.

Toutefois, souvenons-nous qu'à cette étape de traitement, notre système visuel ignore le sens des mots qu'il manipule. Il se contente de détecter quelles chaînes de lettres reviennent fréquemment et apportent de l'information utile à la reconnaissance et à la prononciation des mots. Ainsi, le modèle prédit-il que les « pseudo-morphèmes » – des chaînes de caractères qui ressemblent aux racines des mots, mais qui n'ont en fait aucune relation de sens – seront traités exactement comme des morphèmes. Autrement dit, le système visuel décomposera le verbe « démanger » en « dé- », « mang- » et « -er », même si ce verbe n'a aucun rapport avec l'ingestion de nourriture. De nombreuses expériences, tant en français qu'en anglais, ont montré que tel est bien le cas : l'extraction approximative de l'arbre des morphèmes fait partie des étapes automatiques et inconscientes de la reconnaissance visuelle des mots, en sorte que la présentation du mot « livre » amorce la lecture de « délivrer »[168].

Dès le premier chapitre, j'ai souligné que, pour notre système visuel, chaque mot se comporte comme un arbre dont les feuilles sont les lettres et les branches des combinaisons de lettres. Cette arborescence du mot prend maintenant un sens très littéral : elle coïncide avec l'arbre anatomique bien réel que forment les millions de neurones qui, depuis les détecteurs de traits élémentaires jusqu'aux neurones sensibles aux bigrammes et aux morphèmes, apportent une petite pierre à la reconnaissance du mot. À aucun moment, dans cette hiérarchie, le mot n'est représenté par un neurone unique. À chaque niveau, une population distribuée de cellules représente, comme un tableau pointilliste, la collection de traits qui compose le mot.

Cette structure neuronale, à la fois souple et très structurée, résiste à des changements superficiels de la forme du mot. Un déplacement du mot sur la rétine agit comme un coup de vent qui bouleverserait toutes les feuilles à la périphérie de l'arbre, mais laisserait inchangée l'armature des grosses branches et du tronc. C'est ainsi que l'arborescence neuronale qui représente un mot donné parvient à résister aux changements de position, de taille, de forme et même de l'ordre des lettres qui le composent.

L'arborescence neuronale que je viens de schématiser est probablement encore bien trop simple, comparée à la complexité et à la redondance du système nerveux. Examinons brièvement quelques-uns des raffinements qui pourraient être inclus dans un modèle plus complet.

• Par simplicité, je n'ai dessiné que des connexions excitatrices, ascendantes, et qui lient chaque région à la suivante. Ce serait oublier, toutefois, qu'il existe également des connexions inhibitrices, capables de signaler par exemple l'absence d'une lettre. Il est probable que le code neuronal d'un mot prenne en considération l'absence de certaines lettres ou de certains bigrammes, de même que le code neuronal de l'extincteur, dans l'expérience de Tanifuji, se caractérise autant par l'activation de certaines microrégions du cortex que par l'extinction d'autres secteurs (par exemple la région C de la figure 3.7).

• Dans le système visuel des primates s'observent également de nombreuses connexions latérales qui relient les différents neurones au sein d'une même aire cérébrale. En général, elles connectent des neurones qui codent pour des objets compatibles entre eux et se soutiennent mutuellement. Ces liens latéraux pourraient représenter les relations probabilistes entre les lettres. Ainsi, le fait qu'en français la lettre « q » est presque toujours suivie de la lettre « u » pourrait être codé en connectant, par des liens réciproques, les neurones qui codent pour ces lettres à des positions voisines.

• Enfin, n'oublions pas que le cortex visuel contient également de très nombreuses projections descendantes, qui projettent d'une aire cérébrale vers la précédente dans la hiérarchie. Ces connexions pourraient présélectionner certaines combinaisons de lettres en fonction du contexte. Elles aideraient ainsi à lever certaines ambiguïtés, particulièrement dans le déchiffrage de l'écriture manuscrite, où il n'est guère plausible que nous commencions par reconnaître chaque lettre avec certitude avant de les

assembler en mots. Souvenez-vous du joli bec de l'oiseau, où les lettres « e » et « c » ont la même forme, tout comme les lettres « o » et « a ». Dans de tels cas, la segmentation en lettres pourrait être le résultat de la reconnaissance visuelle des bigrammes ou des mots : la plausibilité du mot « bec » voterait, par le biais des connexions descendantes, pour la présence des lettres « b », « e » et « c »[169]. On retrouve ici l'idée du *pandemonium* de Selfridge, cette assemblée de démons spécialisés qui se transmettent, en criant plus ou moins fort, les données fragmentaires dont ils disposent.

Combien de neurones pour la lecture ?

On pourrait objecter que le modèle hiérarchique que je propose conduit à une explosion du nombre de neurones nécessaires à la lecture. En effet, s'il faut représenter, à chaque étape, toutes les combinaisons possibles du niveau inférieur, le nombre de neurones requis n'augmente-t-il pas de manière exponentielle ?

Cette objection néglige toutefois le fait qu'à chaque fois qu'un neurone extrait une combinaison importante de lettres, il élimine également d'autres distinctions qui ne sont pas pertinentes pour la lecture. La distinction entre majuscule et minuscule, par exemple, cesse d'être effectuée, d'après le modèle, à partir de l'aire V8. De même, au niveau des neurones bigrammes, l'accroissement du nombre de combinaisons de lettres est-il compensé par la diminution du nombre de positions rétiniennes qui sont codées, liée à l'accroissement des champs récepteurs des neurones.

N'oublions pas non plus que, au cours de la lecture, les mouvements des yeux amènent les mots dans une portion très restreinte du champ visuel, proche de la fovéa et principalement à droite du point de fixation. Il est donc probable qu'au cours de l'apprentissage de la lecture, seuls les neurones qui codent pour ces positions soient en partie reconvertis en détecteurs de lettres ou de bigrammes. Cette hypothèse est confortée par l'observation empirique que seuls les mots présentés au centre ou à quelques degrés à droite de la fixation, et dans une orientation proche de l'horizontale, sont lus avec rapidité par la voie occipito-temporale ventrale[170].

Sachant qu'il y a 26 lettres et une vingtaine de positions rétiniennes où les lettres sont reconnaissables, on arrive au chiffre approximatif de 500 détecteurs corticaux de lettres – un nombre qui, à raison de dix colonnes corticales par millimètre carré, tient aisément dans un demi-centimètre carré de cortex. Il en va de même pour les neurones bigrammes : en supposant que seules trois positions soient codées (début, milieu ou fin du mot), et sachant que les 200 bigrammes les plus fréquents permettent de représenter la majorité des mots, on arrive à une estimation similaire de 600 colonnes, soit une surface de l'ordre de 8 × 8 mm de cortex. Enfin, au niveau des combinaisons de bigrammes, il n'y a rien d'absurde à supposer qu'une collection d'environ 500 préfixes, suffixes, racines, et autres graphèmes complexes suffise à représenter les quelques dizaines de milliers de mots dont nous connaissons l'orthographe – soit, à nouveau, un demi-centimètre carré de cortex.

Ces ordres de grandeur, quoique très grossiers, correspondent bien aux hypothèses de la figure 3.10 : la représentation neuronale se déplace d'environ 8 mm vers l'avant à chaque fois que l'on progresse d'un niveau de représentation au sein de la hiérarchie de la forme visuelle du mot. L'imagerie cérébrale confirme que la lecture fait appel à une bande de cortex étendue d'arrière en avant le long du sillon occipito-temporal, de quelques centimètres de longueur, et au sein de laquelle on peut noter des subdivisions fonctionnelles d'abstraction croissante à mesure que l'on progresse vers l'avant du cerveau[171]. Notez également que ces estimations ne tiennent pas compte de l'observation de Tanaka selon laquelle les différents neurones, au sein d'une colonne corticale, peuvent coder pour des variantes subtiles de la même forme de base. Si l'on imagine qu'il existe des colonnes corticales combinatoires, au sein desquelles différents neurones coderaient pour les diverses combinaison d'une consonne avec toutes les voyelles du français (ta, te, ti, to, tu, tan, ten, tin, ton…), ou *vice versa* (sa, na, ta, ra, la, ca…), la compacité de la représentation augmente d'autant. Il suffit alors de quelques dizaines de telles colonnes corticales pour représenter la totalité des mots écrits.

En prenant moins de place, cette dernière solution autorise également l'entrelacement de colonnes corticales dédiées à la lecture au sein d'autres colonnes qui resteraient allouées à la reconnaissance des objets ou des visages. Tant l'imagerie cérébrale que les enregistrements intra-cérébraux

suggèrent en effet que les réponses d'une région du cortex ne sont jamais strictement catégorielles, et qu'il existe toujours un mélange local, plus ou moins dense, de colonnes corticales qui répondent aux différentes catégories d'objets visuels[172].

En bref, le schéma que je propose est entièrement compatible avec la taille limitée du cortex alloué à la reconnaissance visuelle des mots. L'explosion du nombre de neurones nécessaires à la lecture peut être évitée. Il suffit pour cela que les mécanismes d'apprentissage n'allouent de neurones qu'aux combinaisons de lettres les plus fréquentes et les plus informatives. Au niveau des bigrammes, par exemple, on devrait trouver des neurones qui codent pour la paire de lettres EN, présente dans de nombreux mots du français, mais pas pour la paire ZH, qui n'apparaît dans aucun mot. Une expérience récente d'IRM fonctionnelle vient de démontrer un tel biais statistique dans la région occipito-temporale gauche[173]. Ce biais pour la représentation des combinaisons fréquentes pourrait également expliquer que la région de la forme visuelle des mots réponde plus à des mots ou des pseudo-mots plausibles comme « enfroster », qu'à des chaînes aléatoires de consonnes comme « gjkmq », dont la plupart des bigrammes sont très rares en français[174].

À tous les niveaux, l'apprentissage perceptif recherche les combinaisons de traits qui se reproduisent fréquemment. Mon modèle suppose que les lettres et les bigrammes seront automatiquement repérés par ce moyen. Cependant, il n'est pas impossible que d'autres régularités, moins évidentes pour nous, soient jugées plus stables au niveau neuronal. Rien ne permet d'exclure, par exemple, que la distribution particulière de traits qui se forme à la jonction de deux lettres (le petit « x » formé par les lettres p et o dans « po ») ne soit pas utilisée par certains neurones.

Vers une simulation du cortex d'un lecteur

En définitive, on ne pourra prédire avec précision à quoi devrait ressembler l'architecture neuronale de la lecture qu'en simulant, sur ordinateur, ces mécanismes d'apprentissage. Un superordinateur serait nécessaire pour simuler l'effet, sur plusieurs millions de neurones, d'heures d'exposition à la lecture des mots.

Si on disposait d'un tel programme, il serait fascinant d'examiner comment il s'adapterait à différents systèmes d'écriture. S'il était exposé au chinois, on s'attendrait à ce que des neurones deviennent accordés à certains caractères fréquents, mais également qu'ils découvrent les régularités internes aux caractères eux-mêmes. La plupart des caractères chinois sont formés de quelques centaines de marqueurs sémantiques et phonétiques, eux-mêmes composés d'une combinatoire de traits et de courbes standardisés – autant de régularités statistiques que l'apprentissage peut spontanément extraire. De fait, certains chercheurs ont d'ores et déjà testé, avec succès, l'hypothèse que le système visuel des lecteurs chinois fonctionne ainsi par une recomposition hiérarchique et combinatoire des caractères[175].

Même au sein des écritures alphabétiques, la régularité de la langue devrait se refléter dans la taille des unités orthographiques codées par les neurones du cortex temporal ventral. Les langues dont l'orthographe est régulière et transparente, comme l'italien, n'ont besoin que d'un répertoire limité de détecteurs de lettres et de bigrammes. Les langues dont l'orthographe est opaque, comme l'anglais ou, dans une moindre mesure, le français, nécessitent un répertoire plus vaste de neurones afin de coder des unités orthographiques aussi complexes que « eau », « oux » ou « tion »[176]. Ces régularités visuelles d'ordre supérieur, qui dépassent le niveau des lettres, ne peuvent être extraites que par des neurones relativement avancés de la hiérarchie temporale. On s'attend donc à ce que la lecture fasse appel à des régions corticales ventrales plus étendues et situées plus en avant chez les lecteurs de l'anglais que chez ceux de l'italien. C'est exactement ce qu'Eraldo Paulesu et ses collègues ont observé par imagerie cérébrale[177]. En japonais également, les subtiles différences d'activation cérébrale entre l'écriture kanji (hautement irrégulière et qui requiert la mémorisation de milliers de caractères) et l'écriture kana (régulière et qui n'utilise que 46 caractères) peuvent s'expliquer par l'apprentissage de répertoires visuels de taille et de complexité interne radicalement différentes[178].

Ces biais corticaux qui contraignent la lecture

Reste une dernière énigme : pourquoi l'apprentissage de la lecture, quel que soit le système d'écriture, converge-t-il systématiquement vers la même

région du cortex ? Pourquoi la région de la forme visuelle des mots se sépare-t-elle, au moins sur le plan macroscopique, d'autres régions consacrées aux visages ou aux objets ? Pourquoi se retrouve-t-elle, chez tous les individus, dans le même sillon occipito-temporal ? Et pourquoi dans l'hémisphère gauche ?

Pour tenter de comprendre la localisation reproductible de la lecture, il faut se souvenir que le cortex visuel est structuré dès la naissance. Bien qu'il soit doté d'une marge importante d'adaptation, il serait totalement faux de penser qu'il fonctionne comme une ardoise vierge sur laquelle viennent s'imprimer les apprentissages les plus divers[179]. Si tel était le cas, on devrait effectivement s'étonner de voir la mosaïque corticale s'organiser spontanément en régions reproductibles d'un individu à l'autre. En réalité, la lecture repose sur un système ancien, qui conserve en son sein les traces de son histoire évolutive. Les contraintes y sont telles que seule une petite région est adaptée à l'art de la lecture. Les neurones de cette région y possèdent vraisemblablement des propriétés intrinsèques de sensibilité fovéale, de projection vers les aires du langage, et peut-être d'autres encore qui les rendent particulièrement aptes au déchiffrement de l'écriture.

Une première contrainte a été récemment identifiée par Uri Hasson, Rafi Malach et leurs collègues de l'Institut Weizmann[180]. Par imagerie cérébrale, ils ont montré que l'ensemble du système visuel ventral est traversé, sur cinq ou six centimètres, par un vaste gradient de préférence rétinienne (figure 3.11). Chaque point du cortex visuel, même assez éloigné de l'aire visuelle primaire, possède une préférence pour une position sur la rétine. Dans les deux hémisphères, les régions latérales préfèrent les stimuli visuels fins et présentés à proximité de la fovéa, tandis que les régions proches du centre du cerveau répondent préférentiellement à la configuration globale et donc à la périphérie du champ visuel.

On ne connaît pas encore l'origine de ce gradient, mais sa taille imposante et son aspect continu évoquent le gradient d'expression d'un « morphogène », l'une de ces substances chimiques que l'on suppose impliquées dans la mise en place du plan géométrique fondamental de l'organisme au cours de l'embryogenèse[181]. L'idée de base, qui date d'Alan Turing, est qu'en se diffusant à travers les tissus à partir d'une région délimitée, ces substances pourraient indiquer, par leur concentration variable, l'orientation des grands axes de coordonnées du corps et de ses

organes. Supposons, par exemple, qu'un facteur chimique soit plus fortement concentré au centre du cerveau que sur les bords, et supposons que sa concentration module la capacité des neurones à recevoir les entrées des bords de la rétine. On obtiendrait alors un réseau biaisé génétiquement, qui traite plus précisément les stimuli visuels sur les bords du cerveau qu'en son centre – précisément ce qu'a montré Uri Hasson.

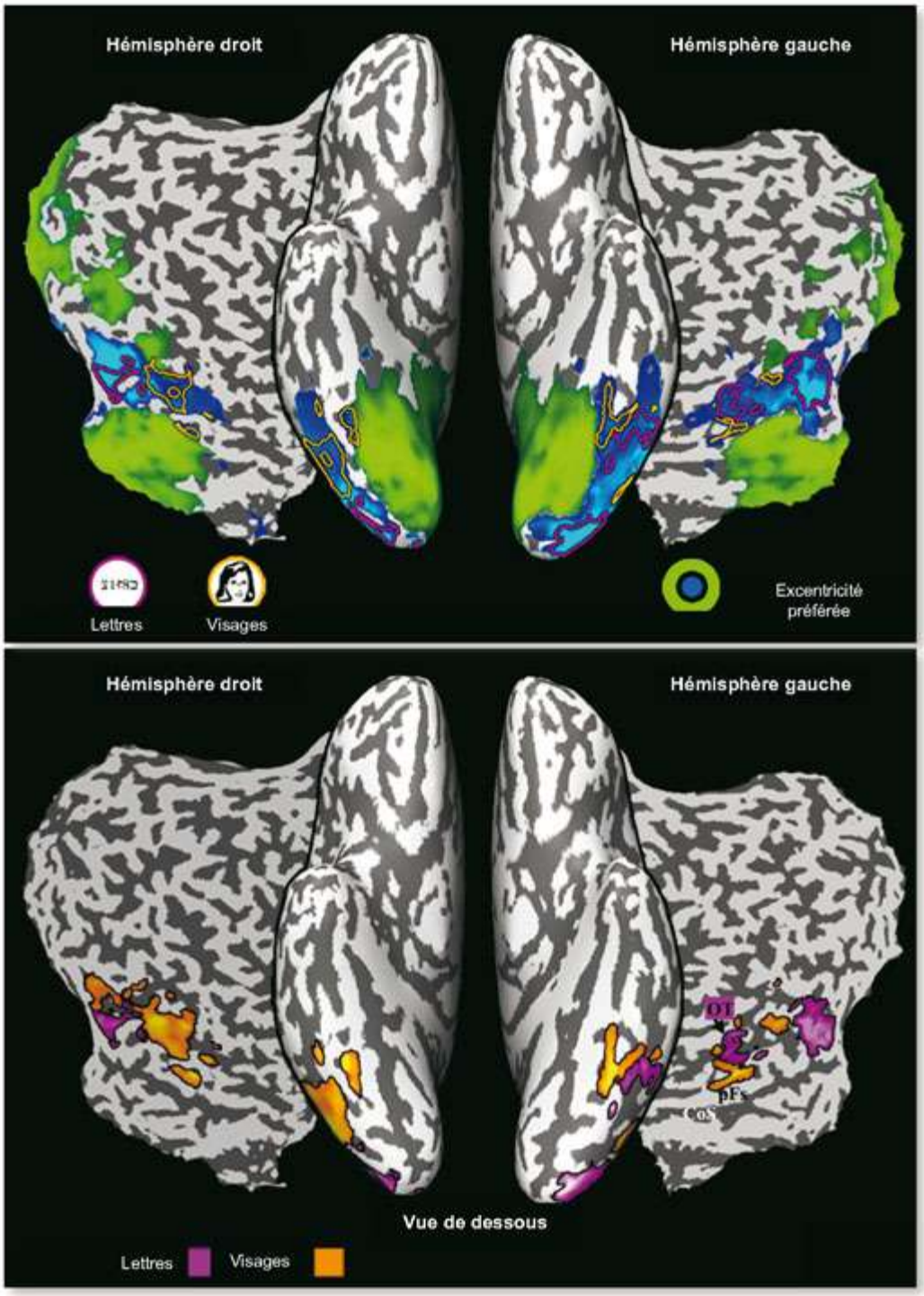


Figure 3.11 De vastes gradients de spécialisation corticale pourraient expliquer que la région de reconnaissance des mots se retrouve toujours au même point du cortex. Un vaste gradient traverse l'ensemble du cortex visuel ventral (en haut) : les régions latérales répondent mieux aux images présentées au centre de la rétine, la fovéa (bleu), tandis que les régions situées au centre du cerveau répondent mieux aux images présentées en périphérie de la rétine (vert). La lecture et la reconnaissance des visages, qui nécessitent toutes deux une analyse minutieuse des détails, échouent dans les territoires corticaux dédiés à la fovéa, qui est la zone la plus précise de la rétine (en bas) (d'après Hasson et coll., 2002).

Quoi qu'il en soit, quel rapport entre ce gradient de préférence rétinienne et la lecture ? Uri Hasson a également observé que, chez tous les individus, la région de la forme visuelle des mots atterrit dans un secteur bien précis de la carte visuelle, caractérisé par sa préférence pour la fovéa. La région des visages, de même, présente un biais pour la fovéa, alors que la région qui code pour les maisons et les scènes d'extérieur préfère la périphérie du champ visuel.

Un scénario épigénétique simple se dégage. Dès la naissance, les neurones des portions latérales du cortex temporal ventral seraient biaisés : les entrées synaptiques les rendraient plus aptes à répondre aux stimuli fins présentés dans la fovéa. Ces neurones seraient alors sélectionnés, de préférence à d'autres, pour le codage visuel des mots, car celui-ci requiert une grande précision. Ainsi pourrait-on expliquer que la position latérale de cette région soit aussi reproductible d'un individu à l'autre. Le gradient de préférence rétinienne fournirait l'un des axes d'un système de coordonnées qui, par des préférences innées, définirait ce point précis du cortex comme le plus apte à répondre aux exigences de la lecture.

Quelles pourraient être les autres contraintes qui fixent la position de cette région selon les deux autres axes de coordonnées ? Nous avons déjà rencontré un second gradient inné, antéro-postérieur, qui définit le niveau hiérarchique où se situe chaque région dans la pyramide des aires visuelles (figure 3.5). Les régions les plus antérieures du cortex visuel préfèrent les objets complexes et structurés ; plus on s'approche du pôle occipital, plus les colonnes corticales répondent à des fragments élémentaires de l'image, jusqu'aux neurones de l'aire visuelle primaire qui répondent à de simples barres[182]. De ce point de vue, la région de la forme visuelle des mots occupe, comme on peut s'y attendre, une région relativement antérieure et étendue, dont la partie arrière répond à des lettres simples tandis que l'avant montre des réponses de plus en plus invariantes et structurées[183].

Une troisième source de biais provient des différences entre les deux hémisphères. Pourquoi la lecture recrute-t-elle systématiquement la région temporale gauche, alors que les visages atterrissent de préférence dans la région droite ? Cette brisure de symétrie pourrait avoir une origine visuelle : il est bien connu que le système visuel de l'hémisphère gauche est meilleur pour la discrimination des petites formes locales, tandis que le droit préfère les formes globales[184]. Un autre facteur pourrait être la latéralisation du

langage qui, dès la naissance, recrute de préférence les régions temporales et frontales de l'hémisphère gauche. Il se pourrait que l'apprentissage de la lecture sélectionne les régions visuelles dont les projections vers les aires du langage sont les plus nombreuses et les plus directes, donc les plus rapides. La région occipito-temporale gauche serait tout naturellement la meilleure candidate, alors que la région droite présenterait un sérieux handicap : pour rejoindre les aires du langage, ses axones doivent faire un long détour par le biais du corps calleux.

Dans le modèle hiérarchique de la figure 3.10, je suggère que la latéralisation à gauche de la reconnaissance visuelle des mots se produit de façon progressive. Les régions de bas niveau doivent être bilatérales : puisque leurs champs récepteurs sont petits, les neurones de chaque hémisphère répondent aux lettres présentées dans la partie opposée du champ visuel. Cependant, à mesure que l'on progresse vers l'avant du cortex, donc vers le haut de la hiérarchie, les champs récepteurs s'élargissent. Il commence donc à exister, dans les deux hémisphères, des neurones capables de réagir aux stimuli présentés à gauche comme à droite. Ma proposition serait qu'à chaque fois qu'il existe ainsi une redondance entre les deux hémisphères dans le codage des mots, les biais visuels ou linguistiques font que c'est l'hémisphère gauche qui l'emporte. Ainsi trouverait-on, à mesure que l'on progresse dans la hiérarchie, de plus en plus de neurones spécialisés pour la lecture dans l'hémisphère gauche.

Résumons-nous. Selon l'hypothèse proposée, il n'existe pas d'aire cérébrale précâblée pour la lecture. Cependant, de nombreux biais innés confèrent à chaque secteur du cortex des qualités et des défauts qui lui sont propres : tel secteur est en prise directe avec les entrées visuelles, tel autre est plus éloigné dans la hiérarchie, celui-ci code les entrées avec une haute précision spatiale, celui-là intègre les entrées d'une vaste région de la rétine… Au cours de l'apprentissage, la lecture atterrit tout simplement à l'endroit du cortex où se trouvent les neurones les mieux adaptés à cette tâche. Chez tous les humains, l'intersection des gradients de préférence innée fait que c'est toujours la même région du cortex qui répond à l'appel – le cortex occipito-temporal gauche.

Que se passerait-il si cette région cessait d'être disponible ? D'autres neurones visuels, légèrement moins efficaces, prendraient le relais. Mon collègue Laurent Cohen et moi-même avons eu l'opportunité de tester cette

hypothèse chez une jeune lectrice. À l'âge de 4 ans, dans le but de guérir une dramatique épilepsie, cette jeune fille avait subi une ablation chirurgicale de la région occipito-temporale gauche. Ainsi, la région qui nous sert tous à reconnaître les mots écrits lui manquait totalement. Pourtant, elle avait appris à lire de façon essentiellement normale : seules des mesures chronométriques très fines montraient que sa lecture était un peu ralentie, de quelques dizaines de millisecondes seulement. Lorsque nous l'avons scannée, à l'âge de 11 ans, nous avons compris comment elle parvenait à lire aussi bien. Bien que ses aires du langage parlé soient restées fortement latéralisées dans l'hémisphère gauche, elle reconnaissait les mots écrits à l'aide de ses aires visuelles droites. Mieux, les mots écrits activaient une région exactement symétrique à celle que l'on retrouve chez une personne normale : dans le sillon occipito-temporal latéral, à la bonne position aussi bien sur l'axe latéral que sur l'axe antéro-postérieur (figure 3.12)[185]. La région de la forme visuelle des mots avait simplement changé d'hémisphère !

D'autres chercheurs ont observé une activation de la même région occipito-temporale droite chez un enfant « hyperlexique », doué d'une précocité remarquable pour la lecture[186]. On la voit également chez certains patients alexiques qui récupèrent d'un accident vasculaire de la région visuelle gauche[187]. Sa contribution aux processus de lecture n'est donc pas si exceptionnelle. Tout se passe comme si les différentes régions corticales étaient ordonnées, par leurs biais intrinsèques, en une sorte de liste d'attente. Si, au cours de l'apprentissage, la première région, en principe optimale, n'est plus disponible, la seconde sur la liste – qui semble être la région symétrique de l'hémisphère droit – entre alors en jeu.

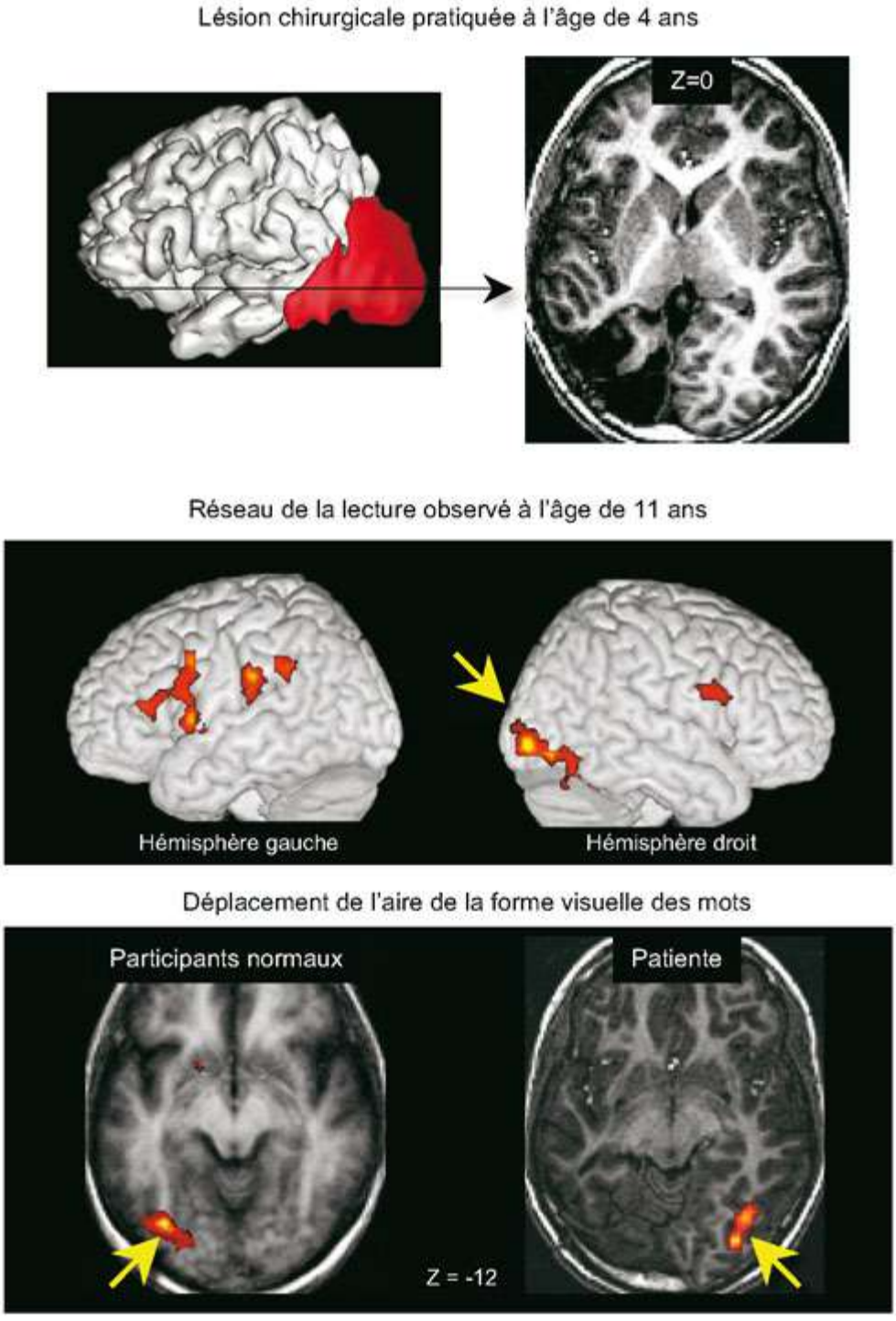

Lésion chirurgicale pratiquée à l'âge de 4 ans
Z=0
Réseau de la lecture observé à l'âge de 11 ans
Hémisphère gauche
Hémisphère droit
Déplacement de l'aire de la forme visuelle des mots
Participants normaux
Patiente
Z = -12

Figure 3.12 Au cours du développement, les réseaux de la lecture sont plus flexibles que dans le cerveau adulte. Chez cette jeune patiente, l'aire normalement allouée à la reconnaissance visuelle des mots, dans la région occipito-temporale gauche, a été retirée lors d'une intervention chirurgicale à l'âge de 4 ans (lésion visible sur les images du haut). Chez l'adulte, une telle lésion rendrait le patient gravement alexique. Pourtant, cette jeune fille a appris à lire sans grande difficulté. Sept ans plus tard, le réseau de la lecture fonctionne normalement, mais l'aire activée par la vision des mots s'est déplacée dans l'hémisphère droit, en un point exactement symétrique de sa position usuelle.

On ne saurait mieux illustrer que la lecture ne dispose pas d’un module cérébral prédéfini : faisant feu de tout bois, elle reconvertit une partie de la hiérarchie neuronale que nous avons héritée de notre évolution.

Chapitre 4
L’invention de la lecture

Si l’architecture du cerveau affecte la manière dont nous lisons, nous devrions en retrouver la trace dans l’histoire comparée des écritures. Effectivement, en dépit de leur apparente diversité, toutes les écritures partagent de nombreuses similitudes qui s’expliquent par la manière dont les neurones du cortex occipito-temporal représentent les informations visuelles. Plus généralement, l’histoire de l’invention de l’écriture s’éclaire d’un jour nouveau à la lumière des neurosciences. Retraçant cette histoire, nous y voyons l’humanité à la recherche incessante d’une notation écrite toujours plus efficace et qui se plie aux contraintes de son organisation cérébrale. Ce n’est donc pas notre cerveau qui a évolué pour l’écriture, mais bien l’écriture qui s’est adaptée à notre cerveau.

« J’ai donc ouï dire qu’il y avait près de Naucratis en Égypte un des anciens dieux de ce pays à qui les Égyptiens ont dédié l’oiseau qu’ils appellent ibis ; ce démon porte le nom de Theuth ; c’est lui qui inventa la numérotation et le calcul, la géométrie et l’astronomie, le trictrac et les dés et enfin l’écriture. »

PLATON,
Phèdre (traduction E. Chambry)

L’idée que l’écriture est un don de Dieu aux hommes figure parmi les « archétypes » de l’humanité, ces thèmes qui, pour des raisons inconnues, resurgissent dans toutes les régions du monde. Pour les Babyloniens, toutes les connaissances magiques, dont l’écriture, revenaient au dieu Ea, seigneur de toute sagesse. En Assyrie, on révérait Nabou, fils de Mardouk, pour avoir appris à l’humanité tous les arts et les techniques, depuis l’architecture jusqu’à l’écriture. Pour les hindous, c’est Ganesh, le dieu de la sagesse à tête d’éléphant, qui en est l’inventeur : il cassa l’une de ses défenses pour en faire un crayon ! La Bible fait écho à cette tradition : Dieu remet à Moïse, pour qu’il les transmette à l’ensemble de l’humanité, les tables de la loi écrites de sa propre main.

Le pouvoir de l’écriture est véritablement magique – non parce qu’elle est un don divin, mais parce qu’elle étend considérablement les compétences de notre cerveau. Blasés par les conquêtes de notre culture, nous oublions de nous étonner qu’un simple primate, *Homo sapiens*, proche cousin du chimpanzé, puisse augmenter ainsi sa mémoire par le biais de quelques tracés sur du papier. Cette transformation était loin d’être inscrite dans l’ordre des choses. C’est une heureuse fortune que nous disposions d’un réseau cérébral qui relie précisément les aires visuelles avec celles du langage, et qui puisse se reconvertir à l’usage des lettres. Cette reconversion est étroitement contrainte : seul un circuit bien localisé semble posséder les

caractéristiques optimales. Encore ne se modifie-t-il guère, car il conserve la plupart des caractères hérités de sa longue évolution. L'inertie biologique conserve donc la haute main sur les innovations culturelles.

Si on adopte, comme je le propose, l'hypothèse du recyclage neuronal, l'histoire de l'écriture ainsi que les difficultés de son apprentissage devraient refléter les contraintes de notre cerveau. Maintenant que nous comprenons mieux quels mécanismes neuronaux rendent la lecture possible, pouvons-nous jeter quelque lumière sur son invention et son apprentissage ? Comment les hommes ont-ils découvert que leur région occipito-temporale pouvait se reconvertir afin de véhiculer la parole par les yeux ? Et comment ce processus de reconversion se répète-t-il dans le cerveau de chaque enfant qui apprend à lire ?

Dans les trois prochains chapitres, je tenterai de répondre à ces questions en examinant, successivement, trois conséquences simples de l'hypothèse du recyclage neuronal.

• La première concerne l'évolution de l'écriture : si notre organisation cérébrale impose des limites aux variations culturelles, on devrait observer, à travers l'ensemble des systèmes d'écriture que l'humanité a inventés, de nombreuses caractéristiques communes qui trahissent les contraintes de notre appareil cérébral.

• La deuxième conséquence concerne l'évolution des compétences humaines : à mesure que notre culture s'est alphabétisée, la compétition, au sein du cerveau, entre cette fonction culturelle nouvelle et les fonctions plus anciennes héritées de notre évolution ne nous a-t-elle pas fait perdre certaines compétences, par exemple dans la reconnaissance visuelle de certaines catégories d'objets ?

• Enfin, la troisième conséquence concerne l'apprentissage de la lecture chez l'enfant : son efficacité doit dépendre du degré de reconversion neuronale nécessaire ainsi que de l'adéquation de la méthode d'enseignement avec la structure préexistante de nos réseaux cérébraux.

Les traits de parenté des écritures

« — Faisons un serpent pour le bruit *ssh* [dit Taffy]. Ceci fera-t-il l'affaire ? Et elle dessina ceci :

— Là, dit-elle, voilà un autre secret surprise, quand vous dessinerez un serpent siffleur auprès de la porte de votre petite arrière-grotte où vous raccommodez les harpons, je saurai que vous travaillez très dur et j'entrerai tout doux comme une souris. Et si vous le dessinez sur un arbre auprès de la rivière quand vous pêchez, je saurai que c'est pour me dire de marcher plus légèrement encore qu'une souris, afin de ne pas faire trembler la rive.
— Parfaitement vrai, dit Tegumaï. Et il y a dans ce jeu-là plus que tu ne penses. Taffy, chérie, j'ai dans l'idée que la fille de ton papa a mis le doigt sur la plus belle chose qui fut jamais inventée depuis que la tribu de Tegumaï a remplacé le silex par les dents de requin pour ses pointes de harpon. Je crois que nous avons découvert le grand secret du monde. »

Rudyard KIPLING,

Comment s'est fait l'alphabet (traduction R. D'Humières et L. Pabulet[188])

D'où vient la forme de nos lettres ? Chaque culture ne doit-elle son écriture qu'à une « histoire comme ça », à la Kipling ? La forme des caractères ne résulte-t-elle que des contingences de l'histoire, ou présente-t-elle également certains traits universels, reflets de notre architecture cérébrale ? À première vue, la diversité des écritures du monde offre une réponse sans appel (figure 4.1). Qu'y a-t-il de commun entre la rondeur des langues indiennes, la rigueur géométrique des majuscules grecques, les suites de courbes et de points de l'arabe, et la diversité des caractères chinois aux parcimonieux traits de pinceau confinés dans un carré virtuel ?

L'hypothèse du recyclage neuronal prédit pourtant que l'inventivité humaine doit être limitée par l'organisation de nos circuits cérébraux. Elle s'oppose en cela au relativisme culturel, selon lequel nos capacités d'apprentissage sont si vastes que les variations culturelles sont potentiellement illimitées. Si le recyclage neuronal présente un fond de vérité, notre enveloppe génétique doit restreindre l'ensemble des objets culturels accessibles. Cette prédiction doit nous conduire à un réexamen de l'étendue de la diversité culturelle : par-delà les variations superficielles les plus évidentes, nous devrions trouver plus de structures partagées que ne le suggère un examen sommaire[189].

Réexaminons, avec cet œil neuf, la diversité des écritures. Une observation plus attentive révèle de nombreux traits communs :

• Toutes les écritures présentent à la fovéa de la rétine une haute densité de traits contrastés, souvent noirs sur fond blanc : cette présentation optimise vraisemblablement la quantité d’information que notre rétine et nos aires visuelles peuvent transmettre à chaque fixation.

• Toutes les écritures utilisent un petit répertoire de formes de base, dont la combinatoire hiérarchique génère des sons, des syllabes et des mots. Les caractères chinois et les kanji japonais ne font pas exception : même s’ils sont au nombre de plusieurs milliers, chaque caractère combine deux, trois ou quatre formes de base, elles-mêmes constituées de quelques traits de base. Cette organisation hiérarchique s’ajuste étroitement à la pyramide des aires corticales qui composent notre système visuel, dont les neurones utilisent un principe combinatoire similaire afin de reconnaître des unités de taille et d’invariance croissantes.

Figure 4.1 Par-delà la diversité de leurs formes de surface, les différents systèmes d'écriture ne partagent-ils pas de nombreux traits ?

• Toutes les écritures considèrent comme acquis que la taille et la position absolues des caractères n'ont pas d'importance – et aucune culture ne doit enseigner explicitement ce fait aux enfants : tous naissent avec un cortex visuel capable d'invariance de translation et de taille. Toutes les cultures, également, traitent l'invariance par rotation différemment : les caractères doivent toujours être orientés dans le même sens. Sans doute les scribes de tous pays ont-ils remarqué le coût supplémentaire qu'imposerait

la reconnaissance de l'écriture selon n'importe quel angle : notre cortex visuel devrait dédier des neurones à chacune des vues séparées d'un angle de plus de 40 degrés.

• La plupart des écritures, enfin, dénotent à la fois des éléments de son et de sens comme si leurs inventeurs avaient implicitement observé que les connexions du cortex visuel ventral lui permettaient de servir de plaque tournante et d'alimenter à la fois les régions temporales supérieures associées au traitement auditif, et les régions temporales moyennes et antérieures associées à la sémantique des mots. Il y a toutefois là une source de variabilité entre les écritures (voir la figure 2.20). Bien qu'il existe toujours une corrélation entre l'écrit et l'oral, la taille de l'unité sonore représentée peut aller du mot ou de la syllabe tout entière jusqu'au phonème ou même au trait phonétique isolé[190]. La physiologie cérébrale ne prescrit rien dans ce domaine, mais le choix qui est fait contraint, en retour, le nombre de symboles requis.

Le nombre d'or de l'écriture

Marc Changizi et son collègue Shinsuke Shimojo, de l'Institut californien de Technologie, sont allés plus loin dans l'analyse des régularités de l'écriture. Ils ont étudié en détail l'organisation visuelle de chacun des caractères de 115 systèmes d'écriture de tous styles et de toutes époques, allant du linéaire B de l'ancienne Crète au runique en passant par l'étrusque ou l'alphabet phonétique international[191]. Première régularité majeure, que le lecteur vérifiera aisément en figure 4.1 : presque tous les caractères sont formés d'environ trois traits (des courbes que l'on peut dessiner sans arrêter ni lever le crayon), avec une variabilité assez faible : que l'on pense à nos lettres T ou P (2 traits), F ou N (3 traits), M ou W (4 traits). Si une écriture nécessite plus de caractères – l'étrusque en compte 23, l'alphabet phonétique en dénombre 170 –, les nouveaux caractères sont formés en créant de nouveaux traits de base afin de conserver toujours environ trois traits par caractère. L'alphabet phonétique, par exemple, utilise les caractères ɕ, ɜ, ɲ, ɷ, ʃ, et ʉ : on voit qu'ils ne sont guère plus compliqués que nos lettres, mais utilisent d'autres courbes de base.

D'où provient ce nombre magique d'environ trois traits par caractère ? Il correspond au taux d'accroissement de complexité des neurones du

cortex visuel : nous avons vu qu'à chaque étape, le champ récepteur augmente d'un facteur 2 ou 3 tandis que s'accroît d'autant l'invariance et la taille des unités représentées. Ainsi, chaque caractère aurait une forme essentiellement optimale pour être aisément reconnaissable, par un neurone unique du cortex temporal ventral, comme une combinaison de deux, trois ou quatre courbes du niveau inférieur.

Il serait même tentant de prolonger l'analyse de Changizi et Shimojo à d'autres niveaux. Un cran plus bas dans la hiérarchie visuelle, il est plausible que les traits fondamentaux eux-mêmes soient reconnus comme conjonction de deux, trois ou quatre segments de droite. Un cran plus haut, au moins dans les écritures alphabétiques, on constate que la plupart des unités composées de plusieurs lettres – racines des mots, préfixes, suffixes, terminaisons grammaticales – font presque toujours deux, trois ou quatre lettres de long. De même en chinois, la majorité des caractères sont formés par la combinatoire de deux, trois ou quatre marqueurs sémantiques et phonétiques. Sur le plan visuel, toutes les écritures semblent donc fondées sur une grande pyramide hiérarchique dont le nombre d'or est 3, plus ou moins 1.

Signes naturels et signes artificiels

Seconde régularité majeure, également découverte par Marc Changizi : les configurations de traits qui forment les caractères sont très reproductibles. Dans toutes les écritures, leur fréquence suit une loi universelle qui reproduit celle que l'on peut observer dans la nature[192].

Pour comprendre cette loi, examinons ensemble comment les différents traits se rejoignent au sein d'un caractère. Deux traits peuvent former un T, un L ou un X ; trois traits peuvent former de nombreuses configurations en F, K, Y, Δ… Considérons ces configurations d'un point de vue purement topologique, sans tenir compte de leur possible distorsion ou de leur orientation sur la page, et comptons combien de fois survient chacune d'entre elles. Une élégante régularité émerge : dans toutes les écritures du monde, le profil de fréquence des configurations est le même (figure 4.2). En particulier, le L et le T sont plus fréquents que le X ; le F est à peu près aussi fréquent que le X, et bien plus fréquent que le Y ou le Δ.

D’où provient cette distribution universelle ? Elle n’est en rien le résultat du hasard : si l’on jette, sur un plan, des segments de droite, leurs intersections ne sont pas réparties selon la distribution observée par Changizi. En revanche, on retrouve cette distribution lorsqu’on analyse les statistiques des images du monde extérieur, qu’il s’agisse de scènes de la nature ou de la vie urbaine. Lorsque plusieurs objets se rejoignent, se masquent ou se superposent, leurs contours forment des configurations caractéristiques où dominent des formes simples comme le T ou le L. Le X n’y est pas si fréquent, sauf lorsqu’une fine branche passe devant un autre contour. Le Δ est plus rare encore dans les scènes naturelles. Lorsqu’on compile des centaines d’images, le nombre de configurations de chaque type que l’on observe corrèle très étroitement avec la distribution universelle des symboles écrits (figure 4.2).

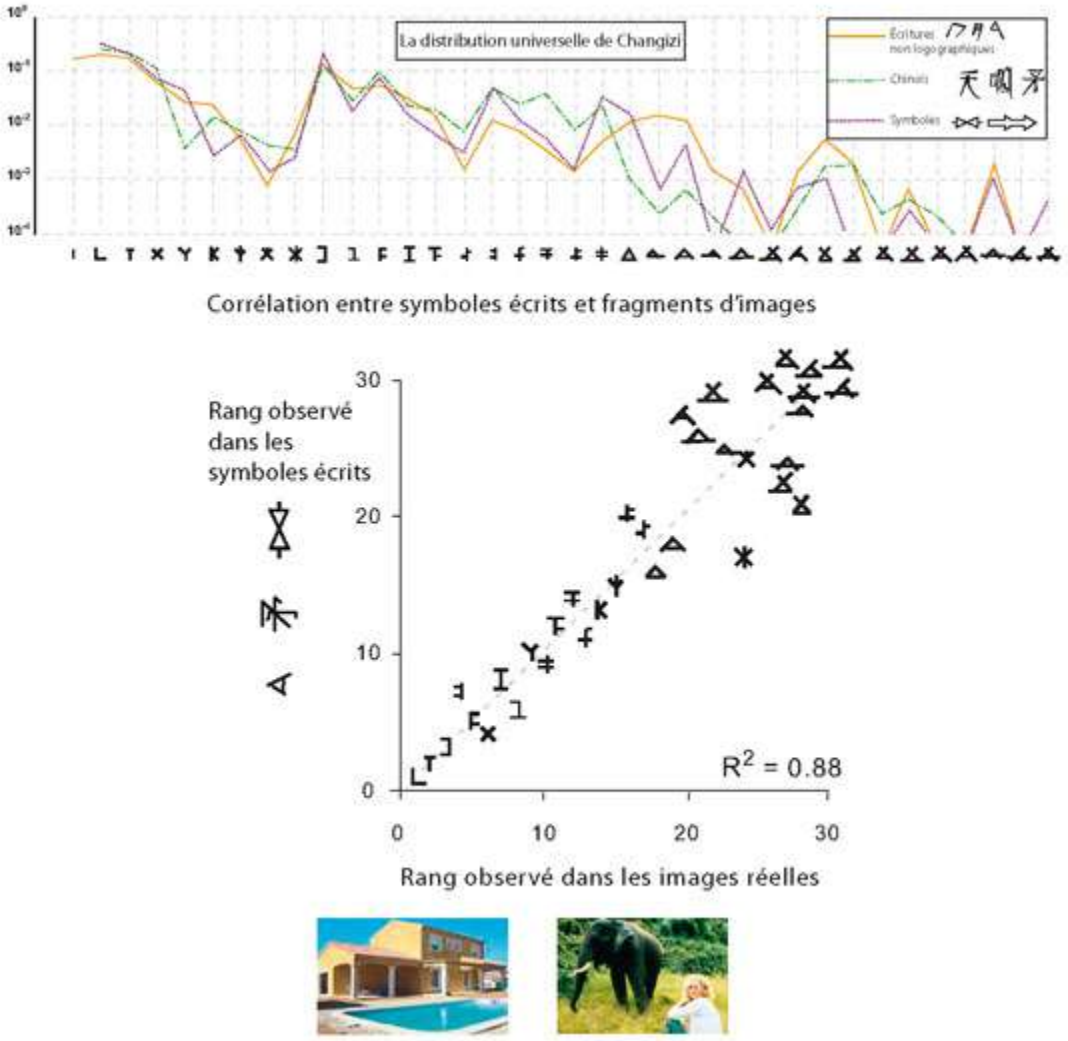


Figure 4.2 Derrière l'apparente diversité des écritures se cachent des régularités universelles, profondément ancrées dans notre cortex visuel. Marc Changizi a ainsi montré que toutes les écritures, qu'elles soient alphabétiques, syllabiques ou logographiques, font appel à un petit ensemble de configurations de traits dont les fréquences suivent un profil universel (en haut). Les configurations les plus fréquentes sont également celles qui se retrouvent le plus souvent dans les images naturelles (en bas), et qui sont donc vraisemblablement codées par les neurones du cortex temporal inférieur avant même que nous n'apprenions à lire (d'après Changizi et coll., 2006).

Dans toutes les cultures du monde, les usagers de l'écriture ont donc, au fil des années, choisi des caractères dont les formes ressemblent à celles que l'on observe dans la nature. Il est probable qu'ils ont agi ainsi parce que, consciemment ou non, ils ont remarqué que ces formes sont les plus faciles à lire. C'est exactement ce qu'incite à penser l'hypothèse du recyclage neuronal : les cultures sélectionnent des objets dont l'apprentissage requiert le minimum de reconversion cérébrale. Au fil de millions d'années d'évolution, ainsi qu'au cours de nos premières années de vie, notre

système visuel s’est adapté aux statistiques des images naturelles, en sorte que nos neurones en détectent les configurations caractéristiques. Par la suite, partout sur notre planète, lorsqu’ils ont eu l’idée de noter la langue par écrit, les hommes ont convergé, par essais et erreurs, vers les formes caractéristiques des « protolettres » dont on a vu qu’elles sont déjà codées au plus profond du cortex temporal ventral des primates[193].

En définitive, l’analyse des écritures du monde souligne, avec une grande force, que leur forme ne résulte pas d’un choix culturel arbitraire. Le problème de la communication écrite est tellement contraint sur le plan cérébral qu’il ne laisse guère de place au relativisme culturel. Notre cerveau de primate n’admet qu’un petit jeu de formes écrites.

Grottes ornées et premiers écrits

Comment l’humanité a-t-elle découvert qu’elle pouvait recycler une partie de son système visuel pour « geler la parole » par écrit ? Empruntons, pour quelques instants, la démarche de l’historien ou du paléoanthropologue, et retraçons, en quelques grandes lignes forcément schématiques, l’histoire de cette grande invention qu’est l’écriture. Nous verrons que toutes les révolutions mentales qu’elle a suscitées peuvent être relues à la lumière de l’hypothèse du recyclage neuronal.

Les plus anciennes grottes ornées – la grotte Chauvet par exemple, qui date de 33 000 ans avant notre ère – présentent déjà des formes très sophistiquées d’art graphique. Très tôt donc, les premiers *Homo sapiens* ont découvert qu’ils pouvaient évoquer sur l’os, l’argile ou la paroi d’une grotte, l’image reconnaissable d’un objet ou d’un animal – et que le simple tracé du contour de la forme suffisait.

C’est une découverte qui pourrait paraître négligeable, mais qui en réalité joue un rôle essentiel dans l’invention de l’écriture. Grâce à elle, point n’est besoin de reproduire en trois dimensions la forme que l’on souhaite évoquer ni même d’en peindre la surface en deux dimensions (même si nos ancêtres ont également vite découvert tout le profit que l’on peut tirer de ces arts que l’on appelle aujourd’hui la sculpture et la peinture). Quelques traits de la main suffisent pour tracer un contour que l’œil reconnaît immédiatement comme un bison ou un cheval. On peut y voir une première manipulation, évidemment strictement empirique, de

l’homme sur son système nerveux. La plupart des cellules de la rétine sont insensibles aux à-plats de couleurs, mais répondent au contraste, que celles-ci soient évoquées par un simple trait ou par la jointure de deux surfaces. Par la gravure et le dessin, l’humanité invente une première forme d’« autostimulation » de son système visuel.

Une tradition ancienne veut que l’écriture trouve son origine dans cette représentation pictographique des formes. L’article « Écriture » de l’*Encyclopédie* de Diderot et d’Alembert l’exprime déjà clairement :

> « Cette manière de communiquer nos idées par des marques et par des figures a consisté d’abord à dessiner tout naturellement les images des choses ; ainsi pour exprimer l’idée d’un homme ou d’un cheval, on a représenté la forme de l’un ou de l’autre. Le premier essai de l’écriture a été, comme on voit, une simple peinture ; on a su peindre avant que de savoir écrire. »

Cette idée simple se heurte cependant à une réalité archéologique plus complexe. Dans la plupart des grottes ornées, les dessins réalistes d’animaux cohabitent avec un riche ensemble de formes non figuratives : séries de points, traits parallèles, damiers, tracés abstraits… Contrairement à ce qu’affirmaient les encyclopédistes, le symbolisme semble donc aussi ancien que le dessin. La forme de ces premiers symboles s’apparente parfois à celle de nos lettres : il serait fascinant d’examiner, par l’analyse distributionnelle de Changizi, si l’homme d’alors avait déjà identifié les symboles les plus aisés à reconnaître.

D’une ancienneté au moins aussi grande, des os gravés portent des séries régulières de marques qui s’apparentent à des calendriers ou à des tenues de comptes. Tous ces symboles manifestes, même s’ils ne sont plus décodables aujourd’hui, nous rappellent que l’homme qui les a gravés n’était pas différent de nous : doté du même cerveau, capable de langage et d’idées abstraites, il a nécessairement tenté, par des moyens certes encore frustes, de les exprimer au même titre que les images concrètes.

Parmi les possibles précurseurs de l’écriture, citons également ces mains peintes, en positif ou en négatif, qui émaillent de nombreuses parois ornées. Leurs doigts apparaissent souvent tronqués. Automutilation, maladie ? Ou plus vraisemblablement peut-être, code symbolique ? Certaines configurations de doigts reviennent plus fréquemment, avec une distribution qui pourrait suivre celle des animaux peints sur les mêmes parois[194]. Il pourrait s’agir d’un langage gestuel de chasse qui indiquerait la nature, les mouvements ou le nombre des proies. Aujourd’hui encore,

certaines populations de chasseurs-cueilleurs utilisent de tels gestes pour communiquer en silence, sans alerter leur gibier. La présence des mains sur les parois gravées refléterait alors une double reconversion symbolique : association arbitraire d'un geste manuel à un objet ou une action, puis fixation symbolique de ce geste sur la paroi.

De la comptabilité à l'écriture

Dans *Le Geste et la Parole*, André Leroi-Gourhan souligne l'importance que le langage et la tradition orale devaient jouer dans la « lecture » des fresques pariétales :

> « L'art figuratif est, à son origine, directement lié au langage et beaucoup plus près de l'écriture au sens le plus large que de l'œuvre d'art. Il est transposition symbolique et non calque de la réalité. […] Pour le signe comme pour le mot, l'abstrait correspond à une adaptation progressive du dispositif moteur d'expression à des sollicitations cérébrales de plus en plus nuancées. De sorte que les plus anciennes figures connues ne représentent pas des chasses, des animaux mourants ou de touchantes scènes de famille, ce sont des chevilles graphiques sans liant descriptif, supports d'un contexte oral irrémédiablement perdu. […] Ce sont en réalité des "mythogrammes", quelque chose qui s'apparente plus à l'idéographie qu'à la pictographie, plus à la pictographie qu'à l'art descriptif. […] Sous cette forme, l'idéographie est antérieure à la pictographie et tout l'art paléolithique est idéographique. »

Il ajoute également cette remarque cruciale :

> « Il est, d'autre part, facile de concevoir un système qui aligne trois traits et le dessin d'un bœuf, sept traits et celui d'un sac de grain. Dans ce cas, la phonétisation est spontanée, la lecture proprement inévitable. C'est probablement la seule forme de pictographie qui ait existé à l'origine de l'écriture. À peine est-elle née qu'elle n'a pu que confluer immédiatement avec le système idéographique préexistant[195]. »

En Mésopotamie – l'actuel Irak –, berceau de la première écriture connue, la symbolisation des nombres semble effectivement avoir joué un rôle essentiel dans l'émergence d'un authentique code écrit[196]. Les fouilles archéologiques révèlent en effet, dans de très nombreux sites datant jusqu'à 8 000 ans avant notre ère, la présence de petits objets d'argile aux formes abstraites : cônes, cylindres, sphères, demi-sphères, tétraèdres, etc.

Pour Denise Schmandt-Besserat, leur rôle ne fait aucun doute : ce sont des *calculi*, de petits marqueurs servant au comptage et au calcul. Certains représenteraient l'unité, d'autres les multiples des bases arithmétiques 10 et 60 (10, 60, 600, etc.). Ce système comptable aurait été en usage au Moyen-Orient pendant au moins cinq millénaires, de – 8000 à – 3000 avant J.-C. On voit apparaître, à Suse, vers – 3300, une très intéressante forme transitionnelle : les mêmes *calculi* sont regroupés dans des pochettes creuses d'argile qui portent des séries d'encoches ; dans certains cas, le nombre de ces encoches correspond exactement au nombre de *calculi*

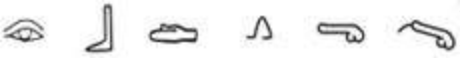
présents à l'intérieur. Progressivement, cette écriture symbolique prend le dessus sur le contenu de l'enveloppe, qui ne sert plus que de témoin de la justesse du compte. Les comptables néolithiques se rendent compte que l'écriture d'un nombre suivi d'un symbole de l'objet (« vingt têtes de bétail », par exemple) suffit à transmettre le message désiré.

Le comptage, cette fois dans le contexte du comput du calendrier, semble avoir joué un rôle similaire dans l'émergence indépendante de l'écriture dans les civilisations précolombiennes d'Amérique du Sud. Dès 2000 avant notre ère, les Olmèques utilisent des symboles gravés ou « glyphes » pour représenter les unités de temps : jours, années, cycles divers… Les Zapotèques, vers 600 avant notre ère, étendent ce système en y adjoignant d'autres signes pour les dates, les lieux et les personnages impliqués dans divers événements historiques.

Ainsi, conformément à l'avertissement d'André Leroi-Gourhan, le codage d'idées abstraites, tout particulièrement celui des nombres, semble avoir joué un rôle essentiel dès les toutes premières étapes de l'émergence de l'écriture, et peut-être dans l'idée même que les concepts peuvent s'écrire. Les premiers symboles écrits sont rarement pictographiques : ce sont souvent des formes géométriques simples.

Cependant, le vocabulaire visuel de ces formes est limité. Ainsi, dans l'ancienne Sumer comme en Égypte, la pictographie apparaît, au moins transitoirement, comme une manière simple d'enrichir le lexique des formes écrites. Son intérêt est une lisibilité immédiate : pas besoin d'apprendre à lire, tout cerveau normal peut reconnaître dans l'image d'un épi le symbole du blé.

Il est fascinant de constater que les premières écritures font appel, pour les signes écrits, à l'ensemble des formes simples que les physiologistes ont associées à des représentations neuronales localisées dans le cortex temporal ventral. Tout se passe comme si l'évolution culturelle, avant de découvrir la petite région du cortex capable d'apprendre à associer des mots à des sons et à des sens, explorait systématiquement l'espace des représentations du cortex visuel. Les hiéroglyphes égyptiens, en particulier, constituent un véritable catalogue des stimuli capables d'activer la mosaïque des neurones du cortex occipito-temporal : animaux ( ), objets et outils (

), parties du corps (), personnages en activité ( ), et figures géométriques simples ( )[197]. Il est intéressant, dans ce contexte, de noter que les inventeurs de l'écriture semblent avoir spontanément évité deux grandes catégories d'images qui, pourtant, sont bien représentées dans le cortex visuel. La première est celle des lieux, bâtiments et paysages. Il en existe de rares exemples dans les hiéroglyphes ( ), mais stylisés au point de n'évoquer aucun sentiment d'espace ou de profondeur. L'autre catégorie sous-exploitée est celle des visages : seuls les Mayas semblent avoir songé à présenter différentes « trognes » pour symboliser les syllabes :

Sur la surface corticale, lieux et visages occupent des aires étendues et bien différenciées, mais distantes de l'aire de la forme visuelle des mots et des régions du langage : la région corticale qui répond aux lieux est proche de la ligne médiane du cortex temporal ventral, tandis que l'aire des visages se trouve principalement dans l'hémisphère droit. Peut-être les premiers scribes ont-ils remarqué leur moindre efficacité pour établir une connexion avec les aires du langage ? L'absence quasi totale de visages dans les signes de l'écriture pourrait être alors interprétée comme une nouvelle preuve indirecte que l'évolution de l'écriture tient compte des contraintes de l'architecture du cerveau.

Les limites de la pictographie

Dans la cinquième *Ennéade*, où il commente le *Phèdre* de Platon cité en exergue, le philosophe néoplatonicien Plotin affiche une admiration sans borne pour l'écriture égyptienne :

> « Lorsque les Égyptiens voulaient exprimer un sens, ils se moquaient allégrement des lettres, des mots et des phrases. Ils n'employaient pas de système de représentation des sons d'une phrase ni de sa prononciation. Dans leur écriture sacrée, ils dessinaient des signes, un pour chaque idée, en sorte qu'ils en exprimaient d'un coup la totalité du sens. Chaque signe distinct constitue, en lui-même, un morceau de savoir, une parcelle de sagesse, un élément de réalité immédiatement présent. Aucun processus de raisonnement n'est nécessaire, aucun décodage laborieux[198]. »

Plotin se trompait lourdement. Si les caractères imagés de l'écriture égyptienne permettaient d'accéder immédiatement au sens, comme une bande dessinée, nous n'aurions pas attendu Champollion pour les déchiffrer. L'idée d'une langue visuelle universelle, que tous les hommes pourraient déchiffrer sans effort d'apprentissage, n'est qu'utopie. Dans l'évolution de l'écriture, l'étape pictographique est si brève qu'on peut douter de son existence même. D'emblée, l'écriture sert à dénoter des idées abstraites. Pour ce faire, elle doit adopter des conventions qui nécessitent un long apprentissage. L'écriture et la lecture deviennent rapidement l'art d'une élite.

Quels sont, en effet, les problèmes auxquels sont confrontés les scribes ? La première difficulté est d'écrire rapidement. Dans certaines tombes égyptiennes, où l'on consacrait des semaines aux écritures sacrées, les hiéroglyphes étaient de véritables chefs-d'œuvre de sculpture en creux ou en bas-relief. Au quotidien, cependant, les Égyptiens disposaient d'une autre écriture manuscrite rapide et simplifiée, le démotique. Dans toutes les régions du monde où l'écriture se répand apparaît une stylisation qui induit un passage rapide de la pictographie à un jeu de caractères symboliques conventionnel.

Les Sumériens, par exemple, écrivaient en enfonçant une pointe de bois, le calame, dans l'argile molle. Leur écriture est dite « cunéiforme » car elle combine à l'infini la seule forme qu'il leur était facile de tracer : une fine encoche en forme de coin. Ainsi furent-ils amenés à créer des dizaines de caractères figés dont les coins stylisent le dessin jusqu'à les rendre méconnaissables (figure 4.3). Le symbole de l'étendue d'eau, par exemple, qui était initialement composé de deux vagues superposées, devint un grand coin et deux petits, une pure convention graphique que chaque scribe devait alors mémoriser.

Le chinois a connu une évolution similaire : même si le caractère « cheval » , tel qu'on peut le voir sur les os oraculaires de la dynastie Shang (1 000 ans avant notre ère), ressemblait initialement à ce quadrupède, il s'est vite épuré et figé. Aujourd'hui, bien malin qui reconnaîtrait l'image d'un cheval dans le caractère , qui a trouvé sa forme définitive dès le III^{e} siècle et s'est encore simplifié récemment en . On estime que seuls

2 % des caractères chinois actuels conservent un contenu pictographique reconnaissable[199].

La stylisation qu'ont connue toutes les grandes civilisations de l'écriture est à l'origine de l'orthographe. Orthographier, c'est littéralement « dessiner droit ». Tant que l'écriture repose sur le dessin, sa forme peut varier librement. À partir du moment où les caractères de l'écriture deviennent arbitraires, il n'existe plus qu'une seule bonne manière de les dessiner, une seule « orthographe ».

Un second facteur éloigne l'écriture de la pictographie : la difficulté de représenter les idées abstraites. Comment dessiner la liberté, le maître et l'esclave, la victoire, un dieu ? Des associations d'idées feront souvent l'affaire. Dans l'écriture cunéiforme, la divinité est une étoile ; enfanter s'écrit en dessinant un oiseau et un œuf ; une ration de nourriture s'exprime par un visage de profil, touchant des lèvres un bol. Il est clair que ce code n'est compréhensible que des initiés.

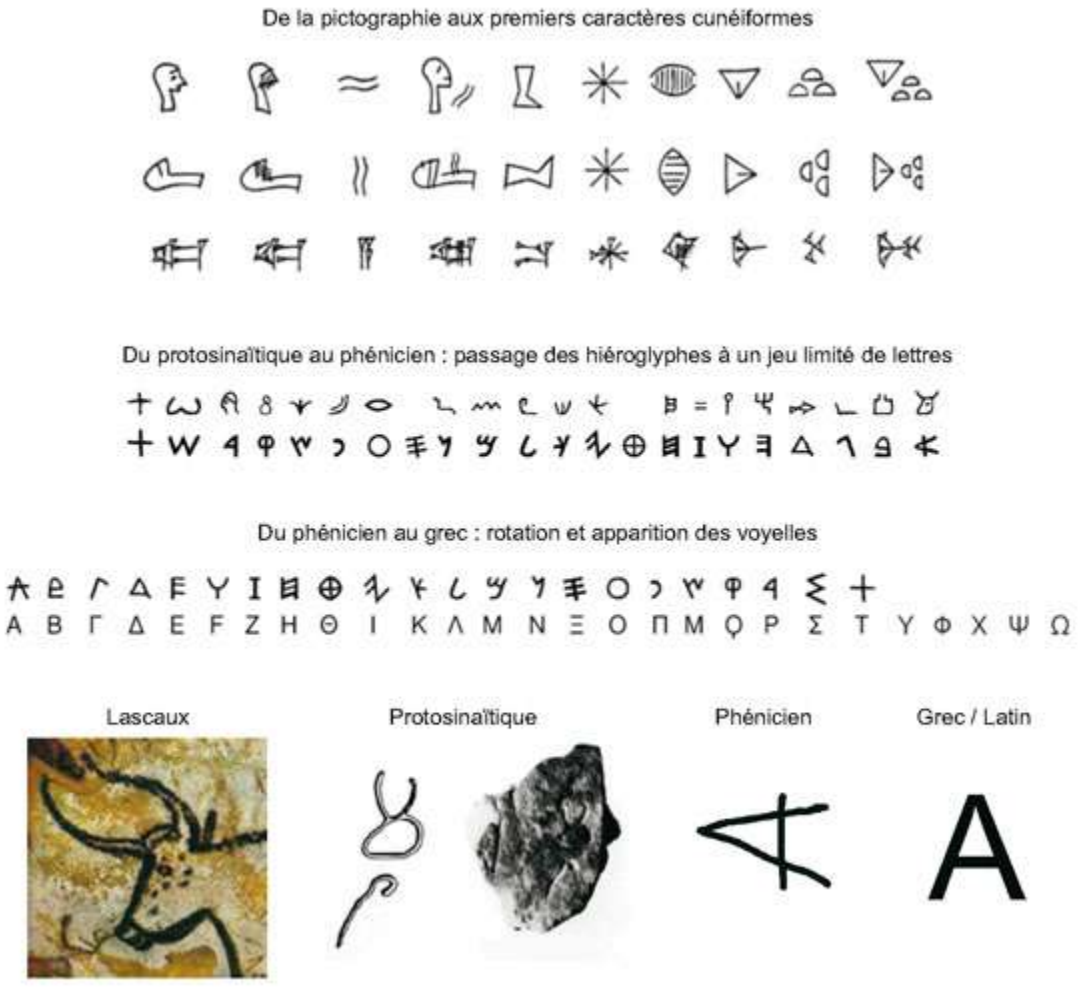

De la pictographie aux premiers caractères cunéiformes
Du protosinaïtique au phénicien : passage des hiéroglyphes à un jeu limité de lettres
Du phénicien au grec : rotation et apparition des voyelles
A B Γ Δ E F Z H Θ I K Λ M N Ξ O Π M Q P Σ T Y Φ X Ψ Ω
Lascaux
Protosinaïtique
Phénicien
Grec / Latin
A

Figure 4.3 Convention et simplification sont des facteurs essentiels de l'évolution de l'écriture.
En sumérien (haut), les premiers caractères conventionnels, à la pictographie souvent reconnaissable, évoluent rapidement en symboles abstraits sous la contrainte d'être tracés uniquement à l'aide de segments de droite en forme de « coins » dans l'argile molle. De même, l'écriture protosinaïtique (au centre) sélectionne un jeu restreint d'images conventionnelles pour représenter les consonnes des langues sémitiques ; lors de leur adoption par les Phéniciens et les Grecs, ces formes se simplifient encore et tournent de 90 ou 180 degrés, sous l'influence de changements de la direction de l'écriture, pour devenir les lettres de l'alphabet. Chacune de ces formes, telle la lettre A (en bas), peut être vue comme l'aboutissement d'un processus d'évolution culturelle qui simplifie tout en conservant un noyau de forme aisément reconnaissable par les neurones de notre cortex temporal inférieur.

Une autre astuce consiste à exploiter les sonorités à l'aide de petits jeux de mots, selon le principe du rébus. Pour écrire un mot abstrait dont le contenu est impossible à dessiner, on emprunte à un ou plusieurs autres mots dont les sonorités imitent le son désiré. Ainsi les scribes sumériens imaginèrent-ils que le mot « vie », *til*, pouvait s'écrire d'une flèche, qui se dit également *ti*[200]. Progressivement, le sens des signes s'effaça tandis que leur sonorité prit une importance croissante. À Sumer, le dessin d'une plante, mot qui se prononce *mu*, fut d'abord adopté pour représenter *mu*,

une année, puis *mu*, un nom, puis des mots grammaticaux tels que le possessif *mu* = « mon », avant d'être enfin considéré comme la représentation de n'importe quelle syllabe *mu*, y compris en début ou en fin d'autres mots.

Par la voie du rébus, les Égyptiens comme les Sumériens parvinrent progressivement à un jeu complet de symboles capable de transcrire l'ensemble des sons de leur langue. Ainsi les Égyptiens disposaient-ils de ce qu'on a coutume d'appeler l'« alphabet hiéroglyphique », une trentaine de caractères qui représentaient toutes les consonnes de leur langue. C'est ce système qui servait à transcrire certains noms propres comme « Alexandre » ou « Cléopâtre » et dont la simplicité permit à Champollion de « casser » le code des hiéroglyphes. Les Sumériens, eux, disposaient d'un jeu de caractères nettement plus étendu qui représentait toutes les syllabes de leur langue (toutes les combinaisons d'une voyelle seule [V] ou d'une voyelle entourée de consonnes [CV, VC ou CVC]). Les deux peuples touchaient pratiquement du doigt le principe alphabétique.

Cependant, ni les Égyptiens ni les Sumériens ne parvinrent à extraire ce pur joyau du système d'écriture au sein duquel il était né. Bien que la stratégie du rébus leur aurait permis de tout écrire, ils continuèrent à employer, en complément de ces signes phonétiques, un vaste appareil supplémentaire de pictogrammes. Le mélange de deux systèmes, l'un fondé sur le sens, l'autre fondé sur les sons, créait une grande ambiguïté. Comment le lecteur pouvait-il savoir, en voyant une étoile, si le scribe voulait dire « Dieu », « étoile », ou simplement la sonorité correspondante de ces mots ? Avec le recul des années, il nous semble évident que les scribes auraient pu simplifier considérablement leur écriture en choisissant de ne dénoter que les sons du langage. Cependant, l'évolution culturelle est parfois d'une immense inertie et ne prend pas de décisions rationnelles. Égyptiens et Sumériens suivirent la pente naturelle de la complexification. Pendant plusieurs centaines d'années, loin de simplifier leur écriture, ces deux civilisations ajoutèrent d'autres marqueurs afin de lever les ambiguïtés. En caractères cunéiformes, par exemple, on vit apparaître des caractères appelés « déterminatifs » dont le rôle était de spécifier le champ sémantique du caractère qu'ils accompagnaient. Ils indiquaient la catégorie à laquelle ce mot se référait : ville, homme, pierre, bois, Dieu, etc. Ainsi, le caractère « charrue » accompagné du déterminatif « bois » indiquait que

l’on voulait faire référence à l’objet charrue ; le même caractère, accompagné du déterminatif « homme », indiquait que l’on parlait d’un laboureur. Les déterminatifs aidaient également à préciser le sens d’un mot écrit en notation syllabique et qui pouvait avoir plusieurs homophones.

Il est frappant de constater que l’écriture égyptienne adopta presque exactement la même solution : un système sophistiqué de déterminatifs incluait des catégories complexes telles que homme, eau, feu, plante, action ou même « concept abstrait ». En définitive, chaque mot finissait par être représenté par un mélange, à des degrés divers, d’éléments de prononciation, de catégorie sémantique et de sens explicite. Prenons l’exemple du verbe « sortir ». Ce mot, qui se prononçait *pr*, s’écrivait avec trois signes :

— une maison, élément phonétique se prononçant également *pr* ;

— une bouche, complément phonétique se prononçant *r* (et confirmant que le symbole de la maison doit être lu pour sa prononciation et non pour son sens) ;

— et enfin une paire de jambes, déterminatif exprimant l’idée du mouvement[201].

Une logique très similaire semble avoir gouverné l’évolution des caractères chinois. Eux aussi sont composés de sous-éléments qui indiquent fréquemment un fragment de sens et un élément de prononciation. Ainsi, le caractère pour « lever de soleil », qui se prononce *qing*, se compose-t-il des éléments « soleil » et « vert » ; le premier est un élément sémantique, le second se prononce *qing* et confère sa prononciation à l’ensemble.

Ces combinatoires peuvent sembler baroques, mais, après tout, sont-elles si différentes de celle qui nous fait écrire « je march**ais**, un march**é**, march**er** », ou encore « seau, sot, sceau, saut » ? Dans notre langue également, nous employons des conventions orthographiques afin de lever l’ambiguïté de la notation des sons.

Pourquoi une telle écriture mixte, « morpho-phonologique », a-t-elle si souvent été adoptée ? Pourquoi semble-t-elle attirer durablement les cultures humaines ? J’y vois la rencontre de plusieurs contraintes, liées à notre mémoire, à notre langue, ainsi qu’à la connectivité de notre cerveau. D’une part, un système purement picto- ou logographique, où chaque mot posséderait son propre symbole, serait impossible à mémoriser en un temps raisonnable, sachant que chacun d’entre nous maîtrise au moins

50 000 mots. Un système combinatoire, fondé sur le son, est donc indispensable. Inversement, la notation du son seul ne peut suffire : dans la plupart des langues, il y a tant d'homonymes comme « saut » et « sot » que l'écriture phonologique pure souffrirait d'immenses ambiguïtés et deviendrait comparable au patient décodage d'un rébus – *el se ré pe é fi cas*. Le meilleur compromis semble donc consister en un système mixte, qui mélange des éléments de son et de sens.

Encore faut-il que ce système reste facile à apprendre par le cerveau du scribe. Sans doute la connectivité particulière de la région occipito-temporale ventrale joue-t-elle ici un rôle particulier : en projetant vers les régions temporales moyennes et frontales qui codent pour le sens des mots, mais aussi vers les régions temporales supérieures responsables de l'analyse auditive et vers le cortex frontal inférieur gauche impliqué dans l'articulation, cette région visuelle sert de pivot capable de distribuer les informations phonologiques et sémantiques de l'écriture. Si cette connectivité ne préexistait pas chez tout être humain, sans doute nos prédécesseurs sumériens ou égyptiens auraient-ils dû inventer un tout autre code visuel.

Une géniale simplification : l'alphabet

Dès son invention, le « virus de l'écriture » s'est rapidement étendu à de nombreuses cultures. Sans doute rencontrait-il dans le cerveau humain un terrain favorable à son apprentissage. Cependant, dans chaque société, l'épidémie demeurait limitée à un petit groupe de spécialistes. La « virulence » de cette invention restait bridée par sa complexité. On estime ainsi que le sumérien possédait initialement 900 signes, nombre qui se réduisit aux alentours de 500 à mesure que les caractères furent dépouillés de leur sens au profit d'une écriture de plus en plus syllabique. De même le scribe égyptien devait-il ingurgiter, au fil d'un long apprentissage, au moins 700 signes. Dans la Chine contemporaine, ce sont plusieurs milliers de caractères que le lettré chinois doit apprendre – le taux d'illettrisme chez les adultes s'établissait d'ailleurs à près de 80 % dans les années 1950, avant qu'une simplification radicale et un effort d'éducation colossal ne ramènent ce chiffre aux environs de 10 %.

Pour que le virus de l'écriture devienne pandémique, il fallait qu'il mute. Comme dans le cas de l'évolution biologique, cette mutation – le principe alphabétique – émergea de populations situées en marge des cultures établies, là où les innovations sont les plus susceptibles de se maintenir. Les premières traces d'une écriture alphabétique datent de 1 700 ans avant notre ère. Elles ont été retrouvées dans la péninsule du Sinaï, à proximité des mines de turquoise exploitées par les pharaons du Moyen et du Nouvel Empire – même si ce désert n'est sans doute pas le lieu de leur invention, qui n'a pas encore été déterminé. L'écriture protosinaïtique reprend les formes de quelques caractères égyptiens, mais elle s'en sert pour noter une autre langue, de la famille des langues sémitiques. Les signes ne sont plus utilisés pour dénoter des significations, mais seulement les sonorités, et uniquement celles des consonnes. Ainsi le répertoire de symboles est-il drastiquement réduit : une vingtaine de signes suffisent à noter les sons avec une régularité parfaite.

Comment cette remarquable invention a-t-elle germé ? Ce moment de l'histoire semble avoir présenté une opportunité particulière d'invention culturelle. D'une part, en adaptant l'écriture à une nouvelle langue, les inventeurs avaient la possibilité d'instituer *de novo* un système d'écriture rationnel. Ils s'inspirèrent sans nul doute des écritures égyptienne et cunéiforme qui les entouraient, mais l'occasion était belle de s'affranchir du poids de leur histoire pour en extraire les principes les plus simples. C'est à cette occasion que les scribes répudièrent le principe d'une écriture idéographique, dont les caractères dénotent, sous une forme imagée, le sens des mots, pour se concentrer exclusivement sur la notation abstraite des racines et des sons de la langue [202].

Les langues sémitiques, auxquelles se rattachent l'hébreu et l'arabe, présentent par ailleurs une morphologie particulière qui facilita certainement l'invention du principe alphabétique. Ces langues mettent l'accent sur les consonnes : les racines de nombreux mots y sont exprimées par une grille fixe de consonnes, tandis que les voyelles sont susceptibles de varier plus librement. Par exemple, en hébreu, la racine *gdl*, qui exprime le sens de « grand », se décline en *gadol*, « grand », *gdola*, « grande », *giddel*, « élever », *gadal*, « grandir », *higdil*, « agrandir », etc. Les inventeurs de l'écriture protosinaïtique exploitèrent cette particularité. Ils comprirent que l'écriture pouvait se contenter de noter la grille abstraite de sons qui

compose la racine des mots. Il n'était donc pas nécessaire de concevoir un inventaire des centaines de syllabes que comptait leur langue. Pour que le lecteur comprenne l'essentiel du message, il suffisait de noter les consonnes et, pour ce faire, un tout petit lexique visuel d'une vingtaine de formes suffisait.

Comment ces formes ont-elles été choisies ? On a simplement sélectionné quelques mots faciles à représenter par un dessin schématique et qui commencent par la consonne désirée. Ainsi, selon ce principe « acrophonique », la consonne *b* est-elle représentée par le plan d'une maison, qui se dit *beth* dans la plupart des langues sémitiques (et qui donnera le nom de la lettre « bêta » en grec). De même l'arrêt glottal, une consonne des langues sémitiques notée par une apostrophe ' et qui vient en tête du mot *'aleph* (« le bœuf »), est-elle représentée dans l'écriture proto-sinaïtique par une tête de bœuf. Cette forme stylisée deviendra la lettre alpha (α) de l'alphabet grec, puis notre A, dans lequel on peut encore reconnaître, après rotation de 180 degrés, le triangle de la tête et les deux cornes de l'animal : ∀. Voilà pourquoi les lettres de l'alphabet grec portent des noms curieux (alpha, bêta, gamma, delta…) : ce sont tout simplement les noms sémitiques d'une vingtaine d'images qui ont donné à nos lettres leur forme, leur nom et la prononciation de leur première consonne.

Il est émouvant de reconnaître, en chacune de nos lettres, un petit dessin simplifié datant de plusieurs milliers d'années : le « m » symbolise les vagues à la surface de l'eau (*mém* ou *mayyūma*), le « N » un serpent (*nahašu*), le « l » un aiguillon (*lamd*), le « k » la paume d'une main (*kaf*), le « R » une tête (*res*).

Il est également fascinant de voir l'évolution culturelle suivre le même chemin que le neurophysiologiste Keiji Tanaka : simplifier un dessin pour n'en conserver que les éléments essentiels de forme (comparer les figures 3.6 et 4.3). Des premiers artistes qui dessinèrent à Lascaux de très réalistes têtes de taureau, aux scribes du Sinaï qui réduisirent cette tête à quelques traits, enfin aux écrivains phéniciens et grecs qui en tirèrent la forme de la lettre A, l'écriture évolua vers un jeu de caractères simplifiés susceptibles d'être immédiatement reconnus par les neurones spécialisés du cortex occipito-temporal ventral. Par tâtonnements, au fil des sélections successives imposées par les passages de génération en génération, l'évolution culturelle convergea vers ce petit répertoire de formes dont

Marc Changizi a montré l'universelle présence dans les images naturelles, et qui s'avèrent les plus faciles à reconnaître par notre système visuel.

Avec l'alphabet, l'écriture se démocratisait enfin. Il n'était plus nécessaire d'investir des années d'apprentissage pour appartenir enfin à la caste enviée des scribes. Toute personne motivée pouvait apprendre à lire et à écrire la vingtaine de caractères de l'alphabet. L'efficacité de la transmission culturelle du virus de l'écriture s'en trouva décuplée. C'est pourquoi l'invention de l'alphabet se répandit et connut une destinée planétaire. À Ougarit, sur la côté syrienne, des inscriptions du XVIII^{e} siècle avant notre ère utilisaient un alphabet cunéiforme de trente signes : le principe de l'alphabet, inventé ailleurs, semble avoir été adapté à la technologie de l'écriture sur tablette d'argile. L'alphabet sémite, directement ou non, donna naissance à tous les grands alphabets de la planète : le phénicien d'abord, et par ce biais, le grec, le cyrillique, l'écriture latine et probablement toutes les écritures de l'Inde ; mais aussi l'écriture araméenne, qui deviendra l'écriture hébraïque, restée inchangée jusqu'à nos jours ; et, par ce biais, l'arabe et ses 200 millions de locuteurs actuels.

Les voyelles, mères de la lecture

Dans cette explosion culturelle, une mention particulière revient à la filière phénicienne, à laquelle nous devons une dernière invention essentielle : la notation explicite des voyelles. Dans les écritures sémitiques, seules les consonnes étaient transcrites, ce qui devait compliquer la tâche du lecteur, puisque les lettres ne spécifiaient que la racine des mots et non leur prononciation intégrale. Pour lever cette ambiguïté, l'écriture phénicienne introduisit une nouveauté : elle spécifia la qualité de certaines voyelles par des symboles additionnels que l'on appelle des *matres lectionis* (« mères de la lecture »). Ces « mères » ne sont autres que des consonnes reconverties pour noter la présence de certaines voyelles. L'idée semble avoir germé de modifications spontanées de prononciation des mots[203]. Par exemple, le mot *panamouwa* (qui s'écrivait avec les consonnes PNMW) fut progressivement déformé par la langue orale en *panamoua*, puis *panamou* (un peu de la même façon que nous prononçons le mot « cacahuète » *cahahouète* ou *cacawet*). Il était alors naturel que la lettre « w » en vienne à noter le son

ou. Par la même voie, la lettre « j » (*jodh*) fut-elle adoptée pour transcrire la voyelle « i ».

Toutefois, ce système demeurait imparfait : il ne notait pas toutes les voyelles et était ambigu puisque les mêmes symboles pouvaient représenter tantôt une consonne, tantôt une voyelle. Ce sont les Grecs qui, en adaptant l'écriture phénicienne à leurs besoins, inventèrent l'alphabet moderne tel que nous le connaissons, avec son inventaire complet de consonnes et de voyelles. Les Grecs adoptèrent les noms phéniciens des lettres (*'aleph*, *beth*, *gimmel*, etc.), même si ces mots ne signifiaient rien dans leur langue. Toutefois, la phonologie de leur langue s'écartait de celle des langues sémitiques. Plusieurs consonnes phéniciennes n'existaient pas en grec. Par exemple, les Grecs ne savaient pas prononcer convenablement l'arrêt glottal noté « ' » qui débute le mot *'aleph*. Ils l'omettaient donc et prononçaient tout simplement *aleph*. C'est pourquoi ils retinrent la forme de la lettre A, qui était pourtant une consonne dans les langues sémitiques, pour noter la voyelle *a*. Il en alla de même pour le iota, le omicron, et le upsilon (issu du « w ») : toutes ces lettres sont des consonnes sémitiques reconverties pour dénoter les voyelles grecques. Le système continuera d'évoluer pendant plusieurs siècles, afin de distinguer des sons qui, eux aussi, évoluaient dans la langue grecque. Ainsi apparurent le *o* long (littéralement *omega*) et le *e* long (la lettre *eta*, empruntée à la consonne phénicienne *heth* qui n'existait plus en grec). Des graphèmes complexes virent également le jour, tels que la conjonction des lettres o et u pour noter le son *ou*, par opposition à la lettre *upsilon* qui finit par représenter exclusivement le son *u*.

Ces ajustements lents ne doivent pas masquer que, d'emblée, un principe nouveau était mis en place. Avec l'alphabet, les Grecs disposaient enfin, pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, d'un inventaire graphique complet et minimal des sons de leur langue. Les symboles de l'écriture ne représentaient plus des éléments de sens ni même des sons complexes tels que des syllabes entières. Sans le savoir, les Grecs avaient découvert l'existence des plus petites unités sonores de la langue parlée, les phonèmes, et ils avaient conçu une notation écrite capable de les transcrire tous. Par tâtonnements, l'évolution culturelle avait convergé vers un jeu minimal de symboles dotés d'une très forte affinité pour notre appareil cérébral, à la fois parce que notre cortex occipito-temporal ventral apprend aisément à les reconnaître, mais aussi parce qu'ils établissent une connexion

directe avec le codage des sons du langage dans le cortex temporal supérieur gauche.

Chapitre 5
Apprendre à lire

Comment l'apprentissage de la lecture modifie-t-il le cerveau de l'enfant ? Apprendre à lire consiste à mettre en connexion deux systèmes cérébraux présents chez le très jeune enfant : le système visuel de reconnaissance des formes et les aires du langage. Cet apprentissage passe par trois grandes phases : l'étape picturale, brève période où l'enfant « photographie » quelques mots ; l'étape phonologique, où il apprend à décoder les lettres en sons ; et l'étape orthographique, où s'automatise la reconnaissance des mots. L'imagerie cérébrale montre que plusieurs circuits cérébraux se modifient, notamment ceux du cortex occipito-temporal gauche. En quelques années, l'activité cérébrale évoquée par les mots grandit, devient sélective et se focalise vers les réseaux de l'adulte.

Ces premiers résultats ouvrent de nouvelles pistes afin d'optimiser l'enseignement de la lecture. Nous comprenons en particulier pourquoi la méthode globale a pu faire illusion bien qu'elle soit vaine et inefficace, car elle ne correspond pas à la manière dont fonctionnent les réseaux neuronaux de la lecture.

« Je voudrais que vous vous émerveilliez, non seulement de ce que vous lisez, mais du miracle que cela soit lisible. »

Vladimir NABOKOV,
Feu pâle (traduction R. Girard et M.-E. Coindreau)

Ces écritures que des générations de scribes ont mis 5 400 ans à peaufiner, le cerveau de nos enfants doit aujourd'hui les absorber en quelques années. Qu'ils soient français, anglais, chinois, arabes ou hébreux, deux ou trois années d'enseignement de la lecture vont leur suffire à déchiffrer les mots de leur langue. Durant ces années cruciales pour l'autonomie de l'enfant, l'écriture, qui n'était jusque-là que des marques bizarres sur le papier, devient soudain lettre vivante et signifiante.

Comment se produit cet apprentissage ? Et quels enseignements pouvons-nous tirer des recherches sur la lecture afin d'améliorer l'efficacité avec laquelle notre système éducatif la transmet aux enfants ?

Selon le modèle du recyclage neuronal, l'écriture s'ancre progressivement dans le cerveau de l'apprenti lecteur. Elle doit y trouver sa place optimale au sein de circuits déjà fonctionnels, mais dont la fonction demande à être minimalement reconvertie. Un processus de « tâtonnement cérébral », qui reproduit en quelques années les essais et erreurs qui ont ponctué l'évolution culturelle millénaire de l'écriture, doit donc se produire dans les circuits visuels et linguistiques de l'enfant. La lecture devrait progressivement converger vers la région occipito-temporale gauche, dont on devrait pouvoir suivre, au fil des mois, la spécialisation progressive pour l'écrit et l'interconnexion avec les autres régions temporales, pariétales et frontales. La psychologie cognitive du développement et les premières données d'imagerie fonctionnelle du cerveau de l'enfant, même si elles

restent fragmentaires, commencent à jeter une certaine lumière sur les étapes qui ponctuent ce processus[204].

Paradoxalement, cependant, le modèle du recyclage neuronal nous incite également à examiner une période du développement qui n'est presque jamais discutée dans les débats sur l'apprentissage de la lecture, celle des toutes premières années de vie, de 0 à 5 ans. En effet, selon mon hypothèse, apprendre à lire n'est possible que parce que le cerveau de l'enfant contient déjà, dans une large mesure, les structures neuronales appropriées – qu'elles soient héritées de l'évolution des primates ou qu'elles résultent elles-mêmes d'un apprentissage antérieur. Le développement linguistique et visuel de l'enfant, avant même qu'il n'apprenne à lire, joue donc un rôle essentiel dans la bonne préparation du cerveau à la lecture. Au chapitre suivant, consacré à la dyslexie, nous verrons d'ailleurs que la cause principale des difficultés de lecture est une perturbation précoce de l'analyse des sons du langage.

De 0 à 5 ans : la naissance d'un futur lecteur

Comment est donc organisé le cerveau de l'enfant avant l'apprentissage de la lecture ? La compréhension du langage parlé et la reconnaissance visuelle invariante, qui sont les deux facultés essentielles que la lecture va recycler et interconnecter, sont déjà en place.

Dès les premiers mois de vie, l'enfant démontre une exceptionnelle compétence pour l'analyse du langage. Depuis une trentaine d'années, on savait que, dès quelques jours de vie, le bébé perçoit les contrastes linguistiques[205] et porte une attention particulière à la prosodie de sa langue maternelle[206]. Mais l'imagerie cérébrale du bébé de 2 ou 3 mois a révélé une organisation anatomique insoupçonnée. Beaucoup s'attendaient à trouver un réseau désorganisé, bien moins focalisé et reproductible que chez l'adulte. Or il n'en est rien – les compétences linguistiques du bébé reposent déjà sur un réseau cortical de l'hémisphère gauche, celui-là même qui s'active dans le cerveau adulte lors du traitement du langage[207]. La région temporale supérieure gauche analyse les sons de la langue, tandis que le sillon temporal supérieur gauche montre déjà une organisation hiérarchique, sans doute liée à une analyse progressive des phonèmes, des mots et des phrases. Même la région frontale inférieure gauche appelée « aire de Broca », une

région traditionnellement impliquée dans la production de la parole et dans l'analyse de la grammaire, s'active chez le bébé de 3 mois lorsqu'il écoute des phrases, alors qu'il ne produit encore que quelques sons indistincts.

Il ne fait donc guère de doute que ces régions cérébrales sont biaisées génétiquement pour s'interconnecter précocement en un réseau qui facilite l'apprentissage du langage. Bien entendu, ces biais initiaux se transforment avec l'apprentissage – le langage ne naît pas tout armé de l'aire de Broca ! Au cours de la première année, le réseau des aires du langage se spécialise progressivement sous l'influence de la langue maternelle[208]. Dès 6 mois, la représentation des voyelles, que l'on appelle l'« espace vocalique », se déforme pour mieux représenter les voyelles de la langue maternelle. Vers 11 ou 12 mois, ce sont les consonnes qui convergent vers le répertoire approprié (les bébés japonais perdent alors la distinction entre les consonnes *r* et *l*).

Le cerveau de l'enfant extrait, trie, classifie les segments de parole comme le ferait un naturaliste ou un statisticien. Il exploite les régularités des chaînes qu'il entend pour en déduire quelles transitions sonores sont possibles et éliminer celles qui sont exclues. C'est ainsi qu'il extrait les règles phonotactiques de sa langue : un bébé polonais acceptera que les consonnes *p*, *r* et *ch* se suivent dans un même mot alors que cette suite sera interdite en français. Les statistiques que ses aires du langage compilent inconsciemment lui permettent également de repérer et de découper les chaînes qui reviennent souvent : ce seront ses premiers mots[209].

Dès la fin de la deuxième année, le vocabulaire de l'enfant explose, tandis que la grammaire se met en place. Au moment où il commence à lire, on estime que l'enfant de 5 ou 6 ans possède une représentation détaillée de la phonologie de sa langue, un vocabulaire de plusieurs milliers de mots, et une maîtrise des principales structures grammaticales et de la manière dont celles-ci véhiculent le sens. Ces « règles et représentations[210] » restent pour la plupart implicites. L'enfant ne sait pas qu'il les possède, et ne pourrait pas les énoncer. Toutefois, elles n'en demeurent pas moins présentes dans un ensemble organisé de circuits neuronaux du langage parlé qui sont prêts à être confrontés à l'expérience de l'écrit.

En parallèle, le système visuel de l'enfant se structure. Si l'on connaît bien l'émergence de la discrimination des couleurs, de l'orientation ou de la profondeur dans les premiers mois de vie, il est regrettable que les

recherches sur la reconnaissance des objets soient encore trop rares : seul le développement de la reconnaissance des visages a fait l'objet d'études approfondies. Dès les premiers jours de vie, l'enfant prête une attention particulière aux visages, et ceux-ci semblent déjà activer, comme chez l'adulte, une partie de la région occipito-temporale droite[211]. Cette spécialisation s'amplifie progressivement au cours de la première année de vie. Le bébé apprend à faire des distinctions raffinées entre les visages des personnes qui l'entourent, alors que, en l'absence d'entraînement spécifique, il perd vers 9 mois la capacité de discriminer les visages d'autres primates[212]. Dans sa deuxième année, il apprend également à reconnaître un visage indépendamment du contexte dans lequel il est présenté[213]. Ce processus de spécialisation semble continuer pendant au moins une dizaine d'années[214].

On ignore, pour l'instant, à quel moment la mosaïque corticale de spécialisation pour les visages, les objets ou les lieux se fige dans sa configuration adulte. Vers 5-6 ans, au moment où l'enfant apprend à lire, bien que les grands processus de reconnaissance visuelle et d'invariance soient en place, il est probable que le système visuel ventral soit encore dans une période d'intense plasticité où la spécialisation fonctionnelle est loin d'être figée – une période particulièrement propice à l'acquisition de nouveaux objets visuels tels que les lettres et les mots.

Trois grandes étapes pour apprendre à lire

> « Ce garçon, Monsieur, ne s'est jamais nourri des friandises qui foisonnent dans les livres ; il n'a jamais, comme qui dirait, mangé du papier ; il n'a jamais bu d'encre ; son intellect n'est pas approvisionné ; c'est un animal sensible seulement dans les parties grossières. »
>
> SHAKESPEARE,
> *Peines d'amour perdues* (traduction François-Victor Hugo)

Examinons à présent comment les compétences visuelles et linguistiques précoces de l'enfant se remanient lors de l'apprentissage de la lecture. En combien de temps, et par le biais de quelles étapes, devient-on un lecteur expert ? En 1985, la psychologue anglaise Uta Frith a proposé un modèle qui fait toujours référence, celui des trois stades de lecture[215].

Notons d'emblée que ces étapes ne sont pas cloisonnées de façon rigide. L'enfant passe continûment d'une étape à l'autre, à l'échelle de quelques mois ou années. Du lecteur novice à l'expert, la transition est lente. Peut-être serait-elle mieux représentée par certains modèles de réseaux de neurones dans lesquels les représentations émergent spontanément d'algorithmes d'apprentissage statistique graduel[216]. Cependant, le balisage de quelques grandes étapes n'est pas inutile, ne fût-ce que dans un but pédagogique.

Selon Uta Frith, la première étape de la lecture, qui survient vers 5 ou 6 ans, est logographique ou picturale. L'enfant n'a pas encore compris la logique de l'écriture. Aussi son système visuel essaie-t-il de reconnaître les mots de la même manière que les objets ou les visages qui l'entourent. Il exploite tous les traits visuels : la forme, mais aussi la couleur, l'orientation des lettres, leurs courbes. À ce stade, qui précède souvent l'enseignement explicite de la lecture, l'enfant parvient à reconnaître son prénom, son nom de famille, et peut-être quelques marques publicitaires à la forme visuelle saillante (« Coca-Cola »).

La taille de ce lexique pictural varie considérablement d'un enfant à l'autre. Chez certains, elle atteindra près d'une centaine de mots tandis que chez d'autres, particulièrement dans les langues transparentes comme l'italien, l'étape picturale peut être très réduite, voire indétectable. Il s'agit, de toute manière, d'une pseudo-lecture qui s'apparente plus à la devinette. Il est facile de montrer que l'enfant ne décode pas la structure du mot et n'en n'exploite que quelques indices visuels. Il se laisse tromper par la ressemblance visuelle des formes (« ChouChou » sera lu *Coca-Cola*). Inversement, il ne reconnaît pas les mots présentés sous une forme différente (« COCA-COLA » en majuscules) et ne généralise pas à des mots nouveaux comme « coco »[217]. Ces caractéristiques suggèrent que le cerveau de l'enfant, à ce stade, réalise une projection directe de la forme globale des mots vers le sens, sans tenir compte de la composition interne en lettres ni de leur prononciation – une pseudo-lecture par une voie visuo-sémantique.

Prendre conscience des phonèmes

Pour progresser, l'enfant doit impérativement développer la seconde voie de lecture, celle qui associe chaque chaîne de lettres à sa prononciation par une procédure systématique de conversion des graphèmes en phonèmes. Cette procédure de décodage se met en place au cours de la seconde étape de l'apprentissage de la lecture, l'étape phonologique, qui apparaît typiquement au cours des premiers mois d'école, vers 6 ou 7 ans. Le mot cesse alors d'être traité dans sa globalité. L'enfant apprend à prêter attention aux petits constituants des mots, qu'il s'agisse des lettres isolées ou des graphèmes complexes (« ch », « oi », « eau », etc.). Il acquiert les correspondances qui associent chacun de ces éléments aux phonèmes du langage, et s'entraîne à assembler ces derniers pour former des mots. C'est le fameux B-A BA.

Il se peut que l'enfant, dès l'étape antérieure, ait appris à reconnaître la forme et le nom des lettres. Toutefois, on peut se demander si cet apprentissage, loin d'aider l'enfant, ne retarde pas l'acquisition de la lecture. En effet, savoir que « S » se prononce *esse*, « K » *ka*, et « I » *i*, n'aide pas à lire le mot « SKI ».

Ce que l'on assemble au cours de la lecture, ce ne sont pas les noms des lettres, mais les phonèmes qu'elles représentent – des unités de parole abstraites et cachées que l'enfant doit découvrir. Une véritable révolution mentale doit se faire jour dans le cerveau de l'enfant avant qu'il ne découvre que la parole peut se décomposer en phonèmes, et que l'on peut recomposer le son *ba* en combinant les phonèmes *b* et *a*. Les premières années de lecture voient l'émergence d'une représentation explicite des sons du langage. L'enfant découvre que la parole est composée d'atomes, les phonèmes, et que l'on peut les recombiner à volonté pour former des mots nouveaux, véritables molécules verbales.

On appelle cette compétence nouvelle la métaphonologie ou la « conscience phonémique ». Les travaux du psychologue José Morais ont montré que la prise de conscience des phonèmes n'est pas automatique : elle dépend de l'enseignement explicite d'un code alphabétique[218]. Même un adulte, s'il n'est pas alphabétisé, n'entend pas spontanément les phonèmes dans les mots.

Pour le montrer, José Morais et ses collègues ont comparé les performances d'adultes portugais dont certains venaient d'apprendre à lire tandis que d'autres, de niveau socio-économique équivalent, étaient

illettrés. Ils leur ont demandé toutes sortes de manipulations du langage parlé. Par exemple, si l'on enlève le premier son de *Porto*, qu'obtient-on ? (*Orto*). Les mots *table* et *taureau* commencent-ils par le même son ? (Oui). Combien y a-t-il de sons dans la syllabe *tap* ? (Trois).

Les résultats étaient clairs : les illettrés échouent systématiquement dès qu'il s'agit de jouer avec les phonèmes des mots. D'autres expériences ont cerné les limites de cet échec. Les illettrés n'éprouvent pas de difficultés à discriminer les sons du langage, par exemple à entendre la différence entre *da* et *ba*. Ils parviennent également à manipuler les syllabes et les rimes des mots. Ainsi n'éprouvent-ils aucune difficulté à reconnaître que *bientôt* et *poteau* ont la même terminaison. Ce sont uniquement les constituants les plus élémentaires, les phonèmes, qu'ils ne repèrent pas. Ils ne se rendent pas compte que les mêmes éléments sonores reviennent à différentes positions dans les mots, et qu'il y a le même phonème *t* dans *ton*, *stop* ou *vite*. Ils ne parviennent pas à jouer au jeu des substitutions, dans lequel, si l'un des joueurs dit un mot, l'autre doit le répéter en remplaçant le premier son par un *p* : l'un dit *balai*, l'autre répond *palais*, et ainsi de suite.

L'un des jeux de mots qui mettent l'accent sur la conscience phonologique est l'art du contrepet, autrefois appelé « antistrophe ». François Rabelais faisait dire à Panurge « qu'il n'y avoit qu'un antistrophe entre femme folle à la messe et femme molle à la fesse ». Depuis la découverte de José Morais, nous savons que l'art du contrepet est l'une des conquêtes de l'écriture alphabétique : les Sumériens, à l'écriture syllabique, ne connaissaient peut-être pas la contrepèterie !

Plus sérieusement, les tâches de conscience phonologique soulignent à quel point l'apprentissage de l'alphabet modifie la manière dont nous traitons la parole. La lecture alphabétique nous donne accès à une fluidité verbale inconnue des illettrés. Elle conduit également à des différences culturelles importantes, selon qu'un lecteur a appris l'alphabet ou non. Ainsi, parmi les adultes chinois, ceux qui n'ont appris que l'écriture chinoise traditionnelle échouent aux tests de conscience phonémique, tandis que ceux qui ont également appris l'écriture pinyin, qui obéit au principe alphabétique, les réussissent[219]. Au sein de la même langue, ce n'est pas simplement le fait d'avoir appris à lire, mais également la nature fine du système d'écriture, qui modifie le traitement du langage.

En résumé, lorsqu'un enfant apprend à déchiffrer une écriture alphabétique, non seulement ses aires visuelles doivent apprendre à décomposer le mot en lettres et en graphèmes, mais une partie de ses régions impliquées dans l'analyse de la parole doit changer de code afin de représenter les phonèmes. Les deux modifications doivent se coordonner avant qu'émerge une voie efficace de conversion graphème-phonème.

Graphèmes et phonèmes : la poule et l'œuf

La chaîne causale qui relie ces apprentissages visuel et linguistique n'est pas encore bien comprise. Faut-il d'abord que l'enfant analyse les sons en phonèmes, avant de pouvoir en apprendre le code écrit ? Ou bien n'est-ce qu'à partir du moment où l'enfant comprend ce que sont les lettres qu'il parvient à décomposer la parole en sons élémentaires ? Ou bien encore s'agit-il là d'un problème « de poule et d'œuf », c'est-à-dire que les deux apprentissages sont étroitement liés, sans qu'il soit possible de dire qui, du graphème ou du phonème, était là le premier ?

Les données ne manquent pas pour montrer que, plus un enfant est à l'aise dans la manipulation consciente des phonèmes, plus vite il apprend à lire[220]. De plus, les exercices qui entraînent les enfants à jouer avec les sons améliorent non seulement la conscience phonémique, mais également les scores de lecture. C'est pourquoi de nombreux auteurs concluent qu'une bonne conscience phonémique est un préalable indispensable à l'acquisition de la lecture. Autrement dit, la découverte des phonèmes précéderait celle des graphèmes.

Cependant, Anne Castles et Max Coltheart[221] ont récemment contesté cette conclusion. Pour eux, le lien causal entre conscience phonémique et facilité de lecture n'est pas démontré. En effet, les données empiriques souffrent d'ambiguïté : la plupart proviennent d'enfants qui connaissent déjà le code de certaines lettres et ont donc pu bénéficier de cet apprentissage visuel pour commencer à segmenter les sons. Castles et Coltheart rappellent également que l'influence de l'orthographe se fait sentir jusque dans les tâches de conscience phonémique : si l'on demande à un enfant américain combien de sons contient un mot, l'influence de l'écrit est telle qu'il en compte plus dans le mot *pitch* que dans le mot *rich*, alors qu'en réalité ces mots ont le même nombre de phonèmes (quatre : *r*-*i*-*t*-

ch)[222]. De même, si l'on demande à un enfant de 9 ans d'enlever le dernier son du mot *liste*, il produit souvent le mot *lise* au lieu de la bonne réponse *lisse*, une erreur influencée par l'orthographe[223]. Ainsi la réussite aux tâches de conscience phonémique est-elle profondément dépendante du code écrit. L'exemple des illettrés et des lecteurs chinois montre clairement qu'en l'absence d'enseignement d'un code alphabétique, la conscience des phonèmes n'apparaît pas.

En définitive, le meilleur modèle de l'apprentissage phonologique est sans doute celui d'une interaction réciproque entre le développement des graphèmes et des phonèmes. L'apprentissage des lettres attire l'attention sur les sons, l'analyse des sons affine à son tour la compréhension des lettres et ainsi de suite dans une spirale causale qui fait émerger simultanément le code graphémique et le code phonémique.

Leur apparition se mesure directement à l'aune des progrès et des erreurs de l'enfant. Dans toutes les langues du monde, l'étape phonologique se reconnaît à ses erreurs de régularisation. Le lecteur débutant sait lire quelques lettres et les transformer en sons, mais il échoue lorsque les mots sont irréguliers : il lira par exemple *fèm* à la place de « femme »[224]. Un autre symptôme est l'effet de complexité syllabique : le débutant sait lire les syllabes simples formées d'une consonne et d'une voyelle (CV), mais éprouve des difficultés croissantes à mesure qu'augmente le nombre de consonnes (CVC, CCVC, et ainsi de suite) ; les syllabes de structure complexe comme « strict » (CCCVCC) sont d'une extrême difficulté pour les lecteurs débutants[225].

Ces deux résultats indiquent que l'apprentissage de la lecture progresse du plus simple au plus complexe. Au sein de la voie graphème-phonème, les premières connexions à se mettre en place concernent les lettres isolées dont la prononciation est régulière. Progressivement, l'enfant apprend à prononcer les graphèmes plus rares et plus complexes. Il repère les groupes de consonnes et apprend comment les combiner pour former une chaîne comme « bl » ou « str ». Il mémorise, enfin, des terminaisons ou des morphèmes particuliers dont la prononciation fait exception : la conjugaison « -ent » qui termine les verbes et ne doit pas se prononcer *an*, la terminaison « -tion » qui se lit *sion*, les mots irréguliers comme « femme » ou « oignon »… Le lecteur expert est, avant tout, un fin lettré qui connaît

quantité de préfixes, de racines ou de suffixes et les associe sans effort à leur prononciation et à leur sens.

L’étape orthographique

L’enfant qui atteint ce niveau d’expertise parvient au troisième stade de la hiérarchie d’Uta Frith : l’étape orthographique. Progressivement se met en place un vaste répertoire d’unités visuelles de taille variable. Le cerveau de l’enfant compile des milliers de statistiques sur la fréquence d’usage de chaque lettre, bigramme, syllabe ou morphème. À ce stade, le temps que met un enfant à lire un mot n’est plus simplement déterminé par le nombre de ses lettres et la complexité de ses graphèmes. Il dépend, de plus en plus, de la nature du mot tout entier et en particulier de sa fréquence dans la langue : les mots rares sont lus plus lentement. L’effet des voisins se fait également sentir : un mot rare comme « fable », entouré de voisins plus fréquents comme « table » et « sable », voit son temps de lecture se ralentir. Tous ces effets reflètent la mise en place de la deuxième route de lecture, la voie lexicale, qui vient progressivement suppléer à la voie de décodage graphème-phonème.

Caractéristique de cette étape est la disparition progressive de toute influence de la longueur des mots. À l’étape précédente, phonologique, l’enfant déchiffre péniblement les mots, une lettre après l’autre, un décodage qui se détecte facilement : le temps de réponse augmente considérablement avec le nombre de lettres[226]. Au fur et à mesure que la lecture s’automatise, cet effet de longueur s’efface. Il est essentiellement absent chez le lecteur expert.

En bref, l’étape orthographique se caractérise par un parallélisme croissant de la reconnaissance des mots : le système visuel fournit un code de plus en plus compact des mots, qui représente d’un coup la configuration de l’ensemble de leurs lettres. Cette « adresse neuronale », organisée comme un arbre hiérarchique, peut à présent être directement transmise d’un seul tenant, à la fois aux régions impliquées dans l’analyse du sens et à celles impliquées dans la prononciation des mots.

Le cerveau de l’apprenti lecteur

Nous venons de voir comment la psychologie du développement a inféré l'existence de trois grandes étapes de lecture. Qu'en est-il au niveau cérébral ? Chaque étape se caractérise-t-elle par une « signature neuronale », un jeu de régions activées qui lui soit propre ? L'imagerie parvient-elle à suivre, dans le cerveau de l'enfant, le passage d'une étape de lecture à la suivante ?

Selon le modèle du recyclage neuronal, on devrait voir apparaître une spécialisation grandissante du système visuel de l'apprenti lecteur. À l'étape picturale, où l'enfant traite le mot comme une image d'objet, l'activité corticale au cours de la lecture devrait concerner les deux hémisphères cérébraux. Progressivement devrait émerger une focalisation vers la région occipito-temporale gauche, où se trouve l'aire de la forme visuelle des mots chez le lecteur adulte expert.

Imaginons à présent que l'on puisse améliorer le grossissement des images pour descendre à l'échelle du neurone ou de la colonne corticale. On y verrait le microcode neuronal de la lecture s'établir. Certains neurones, autrefois impliqués dans la reconnaissance des objets ou des visages, se dédieraient progressivement aux lettres, d'autres aux bigrammes fréquents, d'autres encore aux préfixes, aux suffixes ou aux mots les plus fréquemment rencontrés. En parallèle, on pourrait également voir le code du langage parlé se modifier dans la région temporale gauche. Avec l'émergence de la conscience phonémique, le code neural du langage parlé doit éclater pour laisser place à une structure fine en phonèmes. Enfin, si l'on pouvait suivre les faisceaux de connexions au fil du temps, on verrait se mettre en place un « peigne » de projections régulières liant chacune des unités visuelles à sa prononciation.

Ne nous leurrons pas. Suivre directement, dans le cerveau de l'enfant en développement, les progrès de l'apprentissage et de l'éducation… ce rêve ne deviendra pas réalité avant de nombreuses années. Ce n'est qu'à la fin des années 1990 que les premières images d'IRM fonctionnelle du cerveau de l'enfant ont été obtenues. Non que cette méthode soulève des difficultés éthiques : l'IRM est utilisée depuis plus de vingt ans en pédiatrie, y compris chez le nourrisson, sans qu'aucun effet secondaire n'ait été détecté. L'exposition au champ magnétique, si l'on reste en deçà de seuils parfaitement connus, ne présente aucun danger – à condition, bien sûr, de n'introduire aucun objet métallique susceptible de se transformer en

dangereux projectile. Diverses espèces animales ont passé toute leur vie dans des champs magnétiques élevés qui simulaient un examen d'IRM, sans qu'aucun effet biologique nuisible ne soit détecté[227].

Les vrais obstacles sont de nature expérimentale. On mesure aisément la difficulté de réaliser, sur un jeune enfant, un examen d'une précision d'un millimètre et d'une durée totale d'au moins une demi-heure. Seuls quelques laboratoires ont acquis l'expertise nécessaire. Après avoir recueilli le consentement de l'enfant et des parents, ils accueillent l'enfant pour une première visite au cours de laquelle celui-ci explore une maquette de la machine d'IRM, entend les sons étranges que produit cette machine, et essaie le casque et les lunettes spéciales qui le protègent du bruit et lui diffusent les stimulations auditives et visuelles. Il apprend également à rester parfaitement immobile. Pour ce faire, nos collègues du Sackler Institute de New York ont bricolé un dispositif astucieux : un écran vidéo diffuse le dessin animé préféré de l'enfant, mais s'éteint dès que la tête bouge ! Une fois investi de sa mission, que l'on compare à celle d'un cosmonaute, il est amusant de voir un jeune enfant, convaincu de l'importance de son « travail », collaborer avec la plus grande concentration à l'examen d'IRM.

Comment s'active alors le cerveau d'un jeune enfant qui apprend à lire ? Les résultats fragmentaires dont nous disposons indiquent que, dès 7 ans, le réseau normal de la lecture commence à s'activer lors de la présentation de petits textes[228]. On y voit très bien, déjà, l'aire de la forme visuelle des mots dans la région occipito-temporale gauche, ainsi que les régions temporales latérales. Cependant, un tel instantané, obtenu à un âge fixe, ne peut révéler la dynamique de l'apprentissage. En l'absence d'études longitudinales d'un même enfant au cours de son éducation, les expériences les plus intéressantes sont celles où un grand nombre d'enfants ont été testés, à des âges variés, afin de corréler leurs compétences avec l'activité cérébrale. Le groupe de Bennett et Sally Shaywitz, à l'Université Yale aux États-Unis, a ainsi testé, au fil des années, plusieurs centaines d'enfants. Leurs résultats montrent une évolution très nette : à mesure que la lecture s'améliore, l'activation de la région occipito-temporale gauche augmente, précisément aux coordonnées observées chez l'adulte[229]. Cette augmentation dépend plus du niveau de lecture atteint par l'enfant que de

son âge. Ainsi s'agit-il bien d'un reflet de l'apprentissage et non d'un simple effet de la maturation cérébrale.

Avec un groupe plus restreint d'enfants, d'âge également moins homogène, le groupe de Guinevere Eden à Georgetown n'est pas parvenu à retrouver d'augmentation d'activité ventrale gauche au fil de l'apprentissage. Cependant, ces chercheurs rapportent une décroissance progressive de l'activité occipito-temporale dans la région symétrique de l'hémisphère droit[230]. L'apprentissage impliquerait donc un processus de sélection : partant de l'activation bilatérale évoquée par n'importe quelle image visuelle, le foyer de la reconnaissance visuelle des mots se focaliserait petit à petit vers la région optimale. Ainsi se trouve vérifiée une très ancienne prédiction avancée par Samuel Orton, le père des recherches sur la lecture et la dyslexie, qui énonçait dès 1925 : « L'acquisition de la lecture implique une élision du foyer de l'attention, des images de mémoire déroutantes de l'hémisphère non dominant [c'est-à-dire le droit][231]. »

L'enregistrement de l'activité électrique et magnétique du cerveau de l'enfant confirme cette focalisation progressive[232]. Chez le jeune enfant prélecteur, lorsque l'on présente des mots écrits, on n'observe pas encore la rapide convergence vers l'hémisphère gauche qui, vers 170-200 millisecondes chez l'adulte, reflète l'étape de reconnaissance invariante des chaînes de caractères. Au contraire, dans les toutes premières étapes de la lecture, c'est la région occipito-temporale droite qui semble faire la différence entre les mots et les chaînes aléatoires de lettres. Peut-être s'agit-il là du premier corrélat neuronal de l'étape picturale décrite par Uta Frith, dans laquelle l'enfant photographie quelques mots et les reconnaît par familiarité globale, un peu comme des visages.

Tous les résultats suggèrent que cette utilisation initiale d'une portion étendue des aires visuelles disparaît rapidement au profit d'une utilisation accrue de la région optimale pour la lecture, la région occipito-temporale gauche. Cependant, même dans les années ultérieures, quand apparaît vers 7 ou 8 ans une réponse latéralisée caractéristique de cette région occipito-temporale[233], sa spécialisation n'est pas encore complète[234]. Chez les enfants de 10 ans, l'onde négative qui, vers 170 millisecondes, accompagne la reconnaissance des mots est présente pour les mots fréquents et bien connus de l'enfant, mais contrairement à l'adulte cette réponse ne se généralise pas à des pseudo-mots qui respectent les règles orthographiques (comme

« moulton » ou « fost »). Cette région cérébrale n'atteindra sa maturité qu'au début de l'adolescence – à condition bien sûr que l'enfant lise suffisamment pour devenir expert.

L'apprentissage ne change pas uniquement les réponses aux mots écrits. L'imagerie cérébrale permet également de mesurer des modifications considérables des aires du langage de l'hémisphère gauche. C'est le cas notamment de deux régions cérébrales associées au traitement phonologique : le sillon temporal supérieur et le cortex préfrontal inférieur (l'aire de Broca). Toutes deux augmentent progressivement leur activité à mesure que l'enfant développe sa « conscience phonémique[235] », c'est-à-dire sa capacité à manipuler mentalement les sons du langage. On voit sans doute là le point d'ancrage de la lecture au sein des aires du langage.

Dans le cerveau d'un illettré

L'apprentissage du code écrit transforme profondément la manière d'écouter les sons du langage. En témoigne une dernière expérience d'imagerie cérébrale qui doit être citée ici bien qu'elle ne porte pas sur le cerveau de l'enfant. En l'occurrence, c'est le cerveau de l'adulte qui sert à comprendre celui de l'enfant.

Pour visualiser les bouleversements de l'organisation cérébrale qu'induit l'apprentissage de la lecture, Alexandre Castro-Caldas et ses collègues ont eu l'idée de comparer le cerveau d'adultes alphabétisés avec celui d'illettrés[236]. Il est essentiel, dans ce type d'études, de sélectionner avec soin les participants, car l'illettrisme, dans nos sociétés développées, peut être un signe d'exclusion sociale ou de maladies génétiques ou neurologiques qui, en elles-mêmes, sont susceptibles de causer de grandes différences d'activité cérébrale.

Afin d'assurer un recrutement de personnes qui n'avaient tout simplement pas eu la chance d'aller à l'école, Castro-Caldas s'est focalisé sur une situation propre à certaines familles du sud du Portugal. Dans les années 1930, il n'était guère possible pour ces familles d'envoyer tous leurs enfants à l'école. En général, la fille aînée restait à la maison pour s'occuper de ses frères et sœurs. Elle n'était donc pas scolarisée, contrairement aux filles suivantes. Ainsi était-il possible de comparer, au sein de la même

famille, l'influence de la scolarisation et de l'alphabétisation sur l'organisation du cerveau.

Dans le cadre d'une collaboration internationale, douze femmes portugaises, dont la moitié étaient illettrées, prirent donc l'avion pour Stockholm. À l'Institut Karolinska, elles bénéficièrent d'une IRM anatomique et d'un examen en caméra à positons. On leur demanda une chose toute simple : répéter des mots portugais ou des pseudo-mots qui respectent la structure de cette langue, mais n'ont aucun sens. Les deux groupes de femmes avaient des vocabulaires de taille comparable. Par contre, les illettrées éprouvaient des difficultés particulières avec les pseudo-mots, qu'elles assimilaient fréquemment aux mots qu'elles connaissaient. Ainsi leur arrivait-il de dire *cabeza* (tête) à la place de *capeta*, ou *gravata* (cravate) au lieu de *travata*.

C'est un résultat classique : l'alphabétisation enrichit le code phonologique. L'apprentissage de l'alphabet enseigne à briser les sons en composants élémentaires, les phonèmes. Les personnes alphabétisées maîtrisent donc un code phonologique universel qui leur permet de mieux se représenter les pseudo-mots en mémoire. En l'absence de ce code, les illettrées ne peuvent que se reposer sur des analogies avec les mots qu'elles connaissent – et cela se traduit par une réduction importante de la mémoire des pseudo-mots.

Qu'a révélé l'imagerie cérébrale ? Chez les illettrés, comme on pouvait s'y attendre, il n'y avait presque aucune différence entre les mots et les pseudo-mots, sauf dans une région préfrontale droite impliquée dans la recherche en mémoire. Par contre, chez les personnes alphabétisées, la scolarisation avait profondément modifié les réponses aux pseudo-mots. Parmi le réseau très étendu figurait notamment la région de l'insula antérieure gauche, très proche de la région de Broca activée chez l'enfant au cours du développement.

L'alphabétisation modifie donc les régions activées lors de l'écoute du langage, mais également l'anatomie du cerveau : le corps calleux s'épaissit dans sa partie postérieure qui connecte les régions pariétales des deux hémisphères[237]. Sans doute certaines de ces modifications cérébrales sont-elles responsables de l'un des effets majeurs de la scolarisation : l'augmentation de l'empan de mémoire, particulièrement pour les mots nouveaux ou peu familiers. Toujours dans Phèdre, Platon imagine comment

débattaient le roi égyptien Thamous et le dieu Theuth (aujourd'hui plus connu sous le nom de Thot), inventeur de l'écriture, au sujet des avantages que l'humanité tirerait de cette invention :

> « Voici, ô Roi, dit Theuth, une connaissance qui aura pour effet de rendre les Égyptiens plus instruits et plus capables de se remémorer : mémoire aussi bien qu'instruction ont trouvé leur remède ! »

Mais le roi Thamous, peu convaincu, rétorque :

> « Cette connaissance aura pour résultat, chez ceux qui l'auront acquise, de rendre leurs âmes oublieuses, parce qu'ils cesseront d'exercer leur mémoire : mettant en effet leur confiance dans l'écrit, c'est du dehors, grâce à des empreintes étrangères, non du dedans et grâce à eux-mêmes qu'ils se remémoreront les choses. »

Quatre milliers d'années plus tard, la psychologie de l'illettrisme donne raison à Theuth et inflige un démenti à Thamous – ainsi qu'à Platon : oui, l'apprentissage de la lecture augmente la mémoire. Même si ces résultats préliminaires d'imagerie de l'illettrisme devront être étendus à un plus grand groupe de personnes, avec une méthode d'imagerie plus précise, ils sont les premiers à montrer à quel point la scolarisation et particulièrement l'apprentissage de la lecture transforment massivement les compétences de notre cerveau. Le virus qu'est la lecture nous est inoculé par la voie visuelle, mais son emprise s'étend très vite à l'ensemble des aires du langage, où il démultiplie nos compétences spontanées. Lorsqu'ils apprennent à lire, nos enfants reviennent de l'école littéralement transformés : leur cerveau n'est plus le même.

Que perdons-nous en apprenant à lire ?

Jusqu'ici, nous n'avons abordé que les aspects positifs de l'apprentissage de la lecture. Cependant, mon hypothèse d'un recyclage neuronal conduit à une prédiction moins réjouissante. L'apprentissage de la lecture, en envahissant des circuits neuronaux dédiés à un autre usage, pourrait nous faire perdre certaines capacités cognitives héritées de notre évolution.

Le jeu des réorganisations corticales pourrait en effet se jouer « à somme nulle ». On sait aujourd'hui qu'à de très rares exceptions près, le nombre de neurones corticaux est essentiellement fixe. Si nous en dédions une partie à la reconnaissance visuelle des mots, ils cessent vraisemblablement d'être disponibles pour d'autres usages. Il se pourrait donc que l'apprentissage intensif de la lecture diminue l'espace cortical

disponible pour d'autres compétences. C'est une prédiction simple, presque naïve, de l'hypothèse du recyclage neuronal, et qui mène à une idée étrange : nos ancêtres illettrés possédaient-ils des talents visuels dont nous ignorons jusqu'à l'existence ?

Disons d'emblée que j'aborde ici un sujet très spéculatif, tant les données pertinentes sont rares. Il me faut donc reposer mon argumentation sur des observations indirectes et des raisonnements logiques.

Tout d'abord, l'enveloppe totale de nos apprentissages est-elle fixe ? Pas totalement. Même si le nombre de neurones reste constant, leurs points de contact, les synapses, varient avec l'apprentissage, y compris chez l'adulte. L'accroissement considérable du nombre des synapses et des arborisations axonales et dendritiques au début du développement offre une marge d'apprentissage aux contours inconnus. Le jeu de l'apprentissage ne se joue sans doute pas vraiment à somme nulle, puisque la densité de synapses, chez l'animal, dépend de la richesse des stimulations cognitives qu'apporte l'environnement.

De plus, un même neurone ne peut-il pas participer simultanément à plusieurs fonctions ? La réponse, dans certains cas au moins, est positive : les neurones « associatifs » des cortex préfrontaux, temporaux et pariétaux semblent appartenir à plusieurs assemblées parfois très différentes – un même neurone pariétal peut, par exemple, s'intéresser au nombre d'objets et à leur mouvement[238].

L'apprentissage peut également raffiner la précision du code neural, qui passe d'un codage redondant, où la plupart des neurones font les mêmes discriminations grossières, à une représentation différenciée de l'environnement, où chaque neurone répond avec précision à un jeu de stimuli qui lui sont propres. Lorsqu'un singe est stimulé par des tâches fines de discrimination manuelle, la carte corticale qui représente le sens tactile des doigts sollicités devient plus précise, mieux organisée, et ses champs récepteurs se raffinent. Le même effet est d'ailleurs observé chez les pianistes ou les violonistes : avec l'apprentissage, la carte corticale de la main gauche augmente en surface. La carte stimulée peut alors envahir d'autres territoires corticaux voisins, normalement dédiés à la représentation du bras ou du visage. Cette invasion affecte-t-elle la finesse de notre perception de ces autres parties du corps ? C'est possible, mais on peut également imaginer que se produise un transfert positif : ce que les

neurones ont appris pour la fonction A pourrait, après tout, se révéler utile pour la fonction B. Ainsi, la dextérité manuelle du violoniste accroît-elle vraisemblablement sa capacité d'apprendre à broder ou à taper à la machine.

Si nous revenons à la lecture, il ne fait guère de doute que les heures passées à reconnaître d'infimes différences entre les caractères accroissent les compétences analytiques de notre système visuel. La comparaison avec les illettrés révèle, effectivement, que la perception de formes géométriques s'améliore avec l'apprentissage de la lecture[239].

À ma connaissance, jusqu'à présent ce type de comparaison n'a révélé que des effets positifs de l'apprentissage de la lecture. Mais a-t-on vraiment examiné sur quelles fonctions cognitives la lecture pourrait avoir des effets négatifs ? Par ce biais se pose la question fascinante des précurseurs corticaux de la lecture. Que faisait la région occipito-temporale gauche avant que nous n'apprenions à lire ? Cette région répondait-elle, chez nos ancêtres, à une fonction bien précise, qui aurait joué un rôle important dans notre évolution et que nous aurions perdue ?

Tous les anthropologues qui se rendent chez les peuples de chasseurs-cueilleurs, que ce soit en Amazonie, en Nouvelle-Guinée ou dans le bush africain, en reviennent avec un sentiment d'infériorité. Leurs hôtes, disent-ils, savent si bien *lire* le monde naturel. Leur lecture des traces d'animaux est particulièrement virtuose. L'examen minutieux de quelques branches brisées ou de traces imperceptibles dans le sable ou la poussière leur parle d'un animal précis, de sa taille, de la direction qu'il a prise et d'une myriade d'autres informations qu'ils exploitent avec succès dans leur chasse.

Se pourrait-il que la lecture des traces soit le précurseur cortical de la lecture ? Il n'est pas inconcevable qu'une telle fonction se soit spécialisée à la suite de pressions sélectives que l'on devine particulièrement fortes chez les prédateurs comme chez leur proie. La course aux armements entre chasseur et gibier a produit des spécialisations évolutives aussi raffinées que l'œil de l'aigle ou la course du léopard. Comment n'aurait-elle pas également modifié leur cerveau ?

Ma spéculation rejoint ici la tradition historique chinoise. Selon d'anciennes légendes, l'écriture chinoise aurait été inventée sous le règne de l'empereur Huang Di, vers 2600 avant notre ère, en s'inspirant des traces d'animaux. Le ministre Cang Jie, examinant les empreintes laissées dans la

boue par divers oiseaux, constata qu'elles formaient un petit jeu de formes faciles à reconnaître et s'en servit pour donner naissance aux premiers caractères.

Ce mythe en évoque un autre : l'ancienne métaphore mystique selon laquelle le monde naturel est un livre ouvert, écrit de la main même de Dieu, que nous apprenons à déchiffrer.

> « Que doivent-elles être, toutes les créatures de ce monde, si belles et si bien faites, sinon des lettres distinctes et enluminées qui déclarent si justement la délicatesse et la sagesse de leur auteur ? »,

s'exclame frère Luis de Granada, mystique espagnol du XVI^{e} siècle, dans son *Introduction au symbole de la foi*. Sir Thomas Browne lui répond comme en écho :

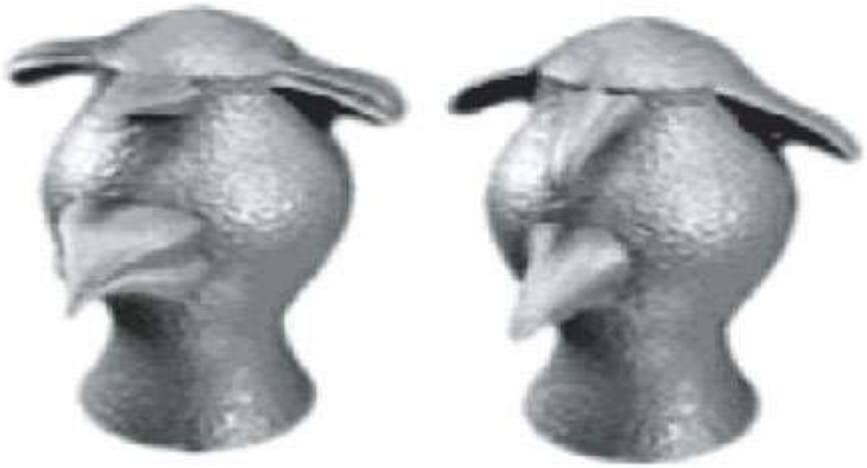
> « Le doigt de Dieu a laissé sur toutes Ses œuvres une inscription, ni graphique ni composée de lettres, mais faite de leurs multiples formes, constitutions, parties et opérations qui, convenablement agencées, composent en effet un mot exprimant leur nature. »

Redescendons de ces sommets mystiques pour regagner notre laboratoire d'imagerie cérébrale. Comment tester l'hypothèse d'une relation antagoniste entre la lecture des mots et celle des traces d'animaux ? Il faudrait sélectionner diverses images naturelles – visages, corps humains, animaux, empreintes, arbres, plantes, minéraux, rivières, nuages, etc. – et en visualiser la mosaïque d'activation cérébrale à la surface du cortex visuel ventral. Toute la difficulté serait de pratiquer cette expérience chez deux groupes de personnes d'âge comparable, les unes alphabétisées, les autres seulement instruites au grand livre de la nature. La mosaïque serait-elle déformée par l'apprentissage de la lecture ? Verrait-on se déplacer, se tasser, voire disparaître certains territoires corticaux au profit de l'apparition d'une réponse aux mots écrits ? En particulier, la région qui répondrait aux traces d'animaux serait-elle repoussée vers l'hémisphère droit, ou tout simplement effacée par l'apprentissage de la lecture ?

À l'heure où j'écris ces lignes, personne n'a encore testé ces idées. Mon équipe espère bien réaliser des expériences de ce type dans les prochaines années. Dans l'intervalle, l'hypothèse du recyclage neuronal peut être abordée dans d'autres domaines que celui de la lecture. En effet, certains adultes passionnés consacrent à un petit domaine d'expertise un temps au moins égal à celui que d'autres passent à lire. Comment se réorganise le cerveau d'un passionné de voitures, qui distingue du premier coup d'œil

une Studebaker Gran Turismo d'une Alfa Romeo Giulietta ? Quelles régions nouvelles se consacrent, chez le spécialiste de l'ornithologie, aux dizaines d'espèces d'avocettes ou de bécasseaux ? Ces apprentissages intensifs ont-il aussi un coût ?

Telles sont les questions qu'examine un réseau de scientifiques spécialisé dans l'expertise et animé par Isabel Gauthier et ses collaborateurs. Ceux-ci ont également convaincu quelques volontaires, moyennant indemnisation, de passer des heures à apprendre à différencier de curieux petits personnages virtuels, les « greebles », une famille de formes conçues pour solliciter les capacités d'apprentissage, de discrimination et de catégorisation visuelles :



Tous ces apprentissages, s'ils sont intensifs, augmentent les réponses du cortex occipito-temporal aux objets de l'expertise. Un expert de voitures présente des activations corticales plus étendues lorsqu'il voit une Studebaker que lorsqu'il aperçoit une avocette. Dans le cerveau d'un ornithologue, c'est l'inverse qui se produit[240].

Beaucoup plus controversée est l'hypothèse que cette expertise envahit systématiquement les régions consacrées aux visages, où elle interfère avec la perception de nos congénères. Selon Isabel Gauthier, l'expertise pour certaines catégories artificielles d'objets, telles que les automobiles, entrerait en compétition avec la reconnaissance des visages dans le même territoire du cortex[241]. Le fan de voitures y perdrait son sens des visages !

Isabel Gauthier et Michaël Tarr prétendent l'avoir démontré par l'imagerie : les réponses cérébrales évoquées par des visages diminuent lorsqu'ils sont présentés en compétition avec les objets de l'expertise, qu'il s'agisse de voitures ou des « greebles »[242]. Quoique faible, l'effet ne serait pas sans impact sur le comportement. Les experts perdraient quelques points dans une mesure de l'efficacité de la reconnaissance des visages, la capacité d'intégrer ses parties en un tout (perception « holistique »).

S'ils demeurent fortement contestés, ces résultats n'en suggèrent pas moins que la compétition corticale, conséquence implicite de mon hypothèse du recyclage neuronal, pourrait avoir une certaine réalité. Je suis fermement convaincu que nous ne pouvons pas consacrer autant de temps et d'espace cortical à une activité telle que l'ornithologie ou la lecture, sans que ce recyclage ait un coût sur d'autres compétences de notre cerveau.

Quand les lettres ont des couleurs

> « A noir, E blanc, I rouge, U vert, O bleu : voyelles, Je dirai quelque jour vos naissances latentes… »
>
> Arthur RIMBAUD,
> *Voyelles*

Une autre source de données, plus inattendue, confirme que l'apprentissage de la lecture entre en compétition avec d'autres représentations corticales. Voyez-vous certaines lettres en couleurs ? Êtes-vous persuadé, comme Rimbaud, que le « A », le « E » ou le « I » ont une couleur bien précise dont vous voyez littéralement la teinte exacte ? Si oui, vous avez la chance de vivre l'expérience de la synesthésie[243] – une étrange fusion des modalités sensorielles qui nous apporte peut-être une nouvelle preuve du recyclage neuronal.

Chez les personnes synesthètes, les modalités sensorielles ne semblent plus étanches, mais s'activent l'une l'autre. La synesthésie prend des formes très diverses : telle personne voit des couleurs et des mouvements chaque fois qu'elle entend des voix ou de la musique. Telle autre ne peut s'empêcher d'associer un halo de couleur à certaines lettres ou certains chiffres. Telle autre encore voit les nombres à des positions spatiales bien

précises, qui dessinent les volutes d'une ligne ou d'une matrice à deux ou trois dimensions[244].

Bien qu'on l'ait parfois attribuée à l'imagination du poète, la synesthésie est une authentique illusion perceptive. La plupart des synesthètes ne sont pas des illuminés, mais des personnes équilibrées parmi lesquelles on trouve aussi bien des artistes (Kandinsky, Messiaen, Nabokov) que des scientifiques (Richard Feynman, Nikola Tesla) et une multitude d'inconnus sans génie particulier. Tous disent s'efforcer de décrire fidèlement leur perception, tel Rimbaud qui aurait confié à son ami Ernest Delahaye à propos du poème *Voyelles* :

> « J'ai cru voir, parfois j'ai cru sentir de cette façon, et je le dis, je le raconte, parce que je trouve cela aussi intéressant qu'autre chose. »

À plusieurs années d'intervalle, tous choisissent les mêmes nuances de couleur, alors qu'une personne qui n'est pas synesthète, même entraînée, varie dans ses choix. Surtout, la synesthésie leur confère certains talents impossibles à simuler. Pour nous autres, commun des mortels, retrouver un chiffre 2 caché parmi des 5 est une gageure, tant ces formes se ressemblent (figure 5.1). Pour de nombreux synesthètes, la réponse saute aux yeux, parce qu'elle se traduit immédiatement par une différence de couleur[245].

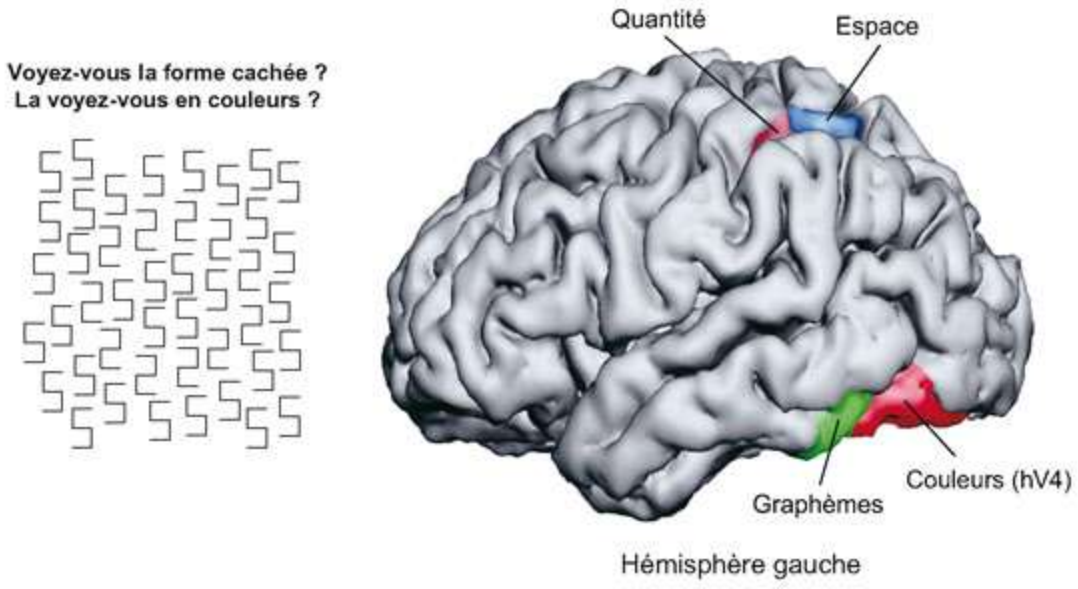


Figure 5.1 La synesthésie – une fusion partielle de certaines modalités sensorielles – pourrait être liée à un échec partiel du recyclage neuronal. Certaines personnes « synesthètes » disent voir les chiffres ou les lettres de l'alphabet en couleurs plus ou moins vives : le A est rouge, le E bleu, etc. Ce n'est pas simplement une vague impression subjective, mais une véritable illusion visuelle : la différence entre les chiffres 2 et 5 leur saute aux yeux car ils la voient en couleurs. L'imagerie fonctionnelle montre que, lorsque ces personnes voient des chiffres ou des lettres, elles activent non seulement la région occipito-temporale gauche,

mais également une région toute proche, l'aire V4 associée à la vision des couleurs. Il est possible qu'au cours de l'apprentissage de la lecture la région occipito-temporale gauche se soit mal différenciée, créant ainsi un code neuronal qui confonde les lettres et les couleurs. D'autres personnes synesthètes voient les nombres dans l'espace, ce qui pourrait s'expliquer par un recouvrement des régions corticales qui codent pour la quantité et les cartes spatiales.

Quel pourrait être le rapport entre la synesthésie et le recyclage neuronal ? Un point frappant est que la synesthésie est souvent évoquée par des formes culturelles apprises. Ce ne sont pas tous les stimuli visuels qui apparaissent en couleurs, mais seulement les lettres et les chiffres, c'est-à-dire précisément les formes que les synesthètes ont apprises tardivement. Il existe également des synesthésies évoquées par d'autres acquisitions culturelles : les mots et les sons d'une langue, les symphonies, les instruments de musique, les plats cuisinés…

Mon hypothèse est que, dans l'enfance, chacun de ces objets culturels, cherchant sa « niche neuronale » à la surface du cortex, entre en compétition avec d'autres représentations, plus anciennes, que l'enfant a mises en place au cours de ses premières années de vie. Cette compétition engendrerait alors une confusion temporaire[246]. Dans le cas de la lecture, comme nous l'avons vu, l'activation cérébrale évoquée par les mots écrits, initialement diffuse, semble tâtonner dans les aires visuelles avant de se concentrer dans la région occipito-temporale gauche, dont le reste du cerveau apprend alors à interpréter les signaux comme des mots. Dans la synesthésie, cette compétition corticale ne se résoudrait pas normalement, un peu comme si les neurones ne parvenaient pas à opter fermement, soit pour le codage des lettres, soit pour celui des couleurs.

Supposons par exemple que la carte des lettres gagne en surface, mais que la carte des couleurs ne recule pas pour autant. Les aires cérébrales en aval reçoivent alors un message ambigu : si les mêmes neurones s'activent lorsque je perçois effectivement du rouge, mais également en réponse à la lettre « I », alors mes aires corticales antérieures, faute de recevoir un signal clair, interpréteront peut-être cette perception ambiguë comme un I entouré d'un halo rouge.

Grâce à l'imagerie cérébrale, Edward Hubbard a confirmé une partie de ce scénario. En scannant le cerveau de synesthètes adultes qui associaient les lettres à des couleurs, il a observé un recouvrement inhabituel des activations corticales[247]. D'habitude, les lettres activent une région bien délimitée. Dans sa partie arrière, elle s'aventure tout près d'une région

visuelle appelée l'aire V4 et qui est associée au traitement de la couleur – une manière classique de l'activer consiste à contraster la présentation de tableaux composés de rectangles colorés, à la manière de Mondrian, avec celle de rectangles en noir et blanc. Or, chez les synesthètes, les lettres évoquent une activation bien trop étendue, qui recouvre largement les régions activées par la couleur.

Tout se passe comme si le recyclage neuronal, chez les synesthètes, n'allait pas à son terme. La division du travail au sein du cortex visuel semble rester inaboutie. La mosaïque corticale de ces adultes reste figée dans un état intermédiaire de spécialisation, sans que les lettres aient totalement convergé vers leur site privilégié. Peut-être le cerveau des synesthètes est-il particulièrement rétif à la révision des représentations corticales ? Selon les spéculations d'Edward Hubbard et de Vilyanur Ramachandran, la synesthésie pourrait être due à la mutation de gènes impliqués dans l'élagage des neurones[248]. De fait, elle se distribue dans les familles suivant une configuration qui pourrait évoquer une transmission génétique, peut-être liée au chromosome X.

Si mon hypothèse est juste, cependant, la synesthésie n'est pas seulement une pathologie génétique. À une étape transitoire du recyclage neuronal, où les cartes corticales des lettres et des couleurs n'ont pas encore convergé vers leur place définitive, une forme de synesthésie pourrait être présente chez tous les enfants. Tous les bébés sont-ils synesthètes ? C'est une hypothèse qui n'est pas dépourvue de tout soutien expérimental, dans la mesure où même de très jeunes enfants perçoivent, par exemple, le lien entre sons aigus et objets petits et pointus[249]. L'un de mes enfants, à la fin de sa septième année, voyait les chiffres 1, 2, 3, 4, 5 et 9 en couleurs. Quelques mois plus tard, les couleurs avaient partiellement changé et, à l'âge de 8 ans, il me disait : « Je me souviens que les chiffres avaient des couleurs, mais maintenant je ne les vois plus. » Toutefois, à ma connaissance, aucune étude systématique n'a approfondi cette possibilité. Il semble simplement plausible que l'association entre symboles et couleurs, chez l'enfant, signale une réorganisation transitoire du cortex au cours de l'apprentissage de la lecture.

Les neurosciences et l'enseignement

Nous venons de voir que l'apprentissage de la lecture s'accompagne de grands bouleversements fonctionnels : la découverte des phonèmes, l'apprentissage du décodage des lettres en sons, la mise en place d'une seconde voie lexicale de lecture, enfin la recherche d'une « niche neuronale » pour la reconnaissance des mots écrits au sein d'autres régions consacrées à la perception des visages, des objets ou de la couleur. Peut-on à présent tirer parti de ces connaissances afin d'en améliorer l'enseignement ? Comment faudrait-il enseigner la lecture aux enfants, afin que leur convergence vers l'état adulte se fasse de la façon la plus douce et la plus efficace possible ? Notre compréhension croissante des mécanismes cérébraux de la lecture nous permet-elle de tirer des conclusions sur les méthodes optimales d'enseignement ?

Soyons réalistes : nous sommes encore loin d'une neuroscience prescriptive. Il y a souvent un gouffre entre la connaissance théorique accumulée dans les laboratoires et sa mise en application dans les écoles. Cette dernière pose des difficultés nouvelles, auxquelles l'intuition et l'expérience des enseignants répondent souvent mieux que les travaux des scientifiques.

Pour autant, les données de l'imagerie et de la psychologie ne sont pas neutres vis-à-vis des grands débats sur la lecture à l'école. N'en déplaise aux relativistes de tout poil, on n'apprend pas à lire de cent manières différentes. Chaque enfant est unique… mais, lorsqu'il faut apprendre à lire, tous ont le même cerveau, qui impose les mêmes contraintes et la même séquence d'apprentissage. Aussi importe-t-il d'examiner quels enseignements – et non prescriptions – les neurosciences cognitives de la lecture peuvent apporter au monde de l'éducation[250].

Commençons par souligner ce que la lecture n'est *pas*. Lecteurs experts et surentraînés, nous avons l'impression d'une reconnaissance immédiate et globale des mots. C'est une intuition trompeuse. Notre cerveau ne passe pas directement de l'image des mots à leur sens. À notre insu, toute une série d'opérations cérébrales et mentales s'enchaînent avant qu'un mot ne soit décodé. Celui-ci est disséqué, puis recomposé en lettres, bigrammes, syllabes, morphèmes… La lecture parallèle et rapide n'est que le résultat ultime, chez le lecteur expert, d'une automatisation de ces étapes de décomposition et de recomposition.

Le but de l'enseignement de la lecture est donc clair : il faut mettre en place cette hiérarchie dans le cerveau, afin que l'enfant puisse reconnaître les lettres et les graphèmes et les transformer aisément en sons du langage. Tous les autres aspects essentiels de l'écrit – apprentissage de l'orthographe, enrichissement du vocabulaire, nuances de sens, plaisir du style – en dépendent directement.

Ce ne serait pas rendre service à l'enfant que de lui faire miroiter les plaisirs de la lecture sans lui en donner, d'abord, les clés. Le décodage phonologique des mots est l'étape clé de la lecture. Toutes les recherches sur les enfants et les illettrés que j'ai décrites au début de ce chapitre en témoignent : la conversion graphème-phonème est une invention unique dans l'histoire de l'écriture, qui transforme radicalement le cerveau de l'enfant et sa manière d'écouter les sons du langage. Elle ne se développe pas spontanément, il faut donc l'enseigner. La lecture par la voie directe ou orthographique, qui mène en parallèle des lettres au sens, ne devient efficace qu'après plusieurs années de lecture par la voie phonologique.

Le grand débat des méthodes de lecture

La psychologie cognitive réfute ainsi, très directement, toute idée d'enseigner la lecture par une méthode globale ou idéovisuelle. De quoi s'agit-il ? Disons, pour simplifier, que cette méthode pédagogique propose à l'enfant d'associer directement les mots écrits, voire des phrases entières, à leur sens, en refusant d'enseigner explicitement les correspondances graphèmes-phonèmes.

La méthode globale est issue d'une idée généreuse : refuser le « dressage » des enfants, que l'école primaire est parfois accusée de transformer en petites mécaniques à ânonner « pa, pe, pi, po, pu, papa a le tutu de Lili ». Récusant la primauté de la mécanique, elle souhaite replacer le sens au centre de la lecture en donnant d'emblée aux enfants des textes censés les intéresser, leur laissant le plaisir d'y trouver eux-mêmes les phrases, puis les mots, puis les règles orthographiques. Ne redonne-t-elle pas ainsi l'initiative aux enfants ? À eux de construire leur propre apprentissage, en découvrant par eux-mêmes les règles de la lecture. Et tant pis si, au départ, l'enfant joue aux devinettes et lit : « Le minou a très soif » au lieu de : « Le chat boit du lait » – il est sur la bonne voie, prétendent

certains partisans de la lecture globale, car il grandit en autonomie et découvre d'emblée le plaisir du sens.

Dans les années 1950-1960, le monde de l'éducation se polarise ainsi dans une véritable guerre entre les progressistes, pour qui la méthode globale libère l'inventivité des enfants, et les tenants de la pédagogie traditionnelle. Qu'en est-il aujourd'hui ? Pour beaucoup, la hache de guerre est enterrée. Chercheurs, enseignants, ministres, tous s'accordent : en dépit des idées généreuses qui la fondent, la méthode globale ne fonctionne pas, elle a conduit une génération d'enfants à l'échec. Jack Lang, dans *Le Monde* s'écriait en 2002 : « Aux oubliettes la méthode globale ! » Luc Ferry, alors ministre de l'Éducation, résumait le consensus à l'Assemblée nationale en 2003 : « La méthode globale est en effet calamiteuse. Cela étant, elle n'est presque plus utilisée, déjà depuis longtemps, et elle est depuis l'an dernier, par instruction officielle, fortement déconseillée. »

Est-il donc encore la peine d'en débattre ? Oui, car, poursuit Luc Ferry, « le problème est aujourd'hui celui des méthodes mixtes, où l'élève apprend par exemple à reconnaître globalement son nom avant de savoir le décomposer en syllabes ». Le constat est repris par son successeur au ministère de l'Éducation nationale, Gilles de Robien, qui souligne que « des méthodes à départ global continuent d'exister ».

Dans les faits, quoique officiellement vouée aux gémonies, la méthode globale continue d'infiltrer les programmes, ne fût-ce que par inertie ou par habitude. Le corps enseignant, désorienté par tant d'allers et retours, ne peut se résoudre à abandonner toute une philosophie, mais aussi des habitudes, des exercices qui ont été sa seule formation. Ainsi, dans *Qu'apprend-on à l'école élémentaire ?*, ouvrage du Centre national de documentation pédagogique préfacé par Jack Lang et paru en 2002, au sein d'un chapitre qui souligne pertinemment l'importance d'« avoir compris le principe qui gouverne le codage alphabétique des mots » et énonce diplomatiquement que le choix de la méthode globale « comporte plus d'inconvénients que d'avantages », figure l'étonnante conclusion suivante :

> « On peut toutefois considérer que la plupart de ces méthodes [globales ou semi-globales], par le très large usage qu'elles font des activités d'écriture, parviennent aussi à enseigner, de manière moins explicite, les relations entre graphèmes et phonèmes. Il appartient aux enseignants de choisir la voie qui conduit le plus efficacement tous les élèves à toutes les compétences fixées par les programmes[251] […]. »

Depuis des années, les instructions officielles soufflent ainsi le chaud et le froid. Elles autorisent chaque enseignant à choisir sa méthode favorite, ce qui revient à nier qu'il existe des méthodes meilleures que d'autres. Dans les écoles se poursuivent donc, aux côtés de l'enseignement de la syllabification et des correspondances graphèmes-phonèmes, les activités héritées de la méthode globale : appariement d'un mot avec une image, reconnaissance du contour des mots, reconnaissance du prénom et du nom quelle que soit l'irrégularité de son orthographe (figure 5.2). Ce n'est que tout récemment que le ministère de l'Éducation nationale a exprimé, avec force, l'inutilité de ces pratiques et les a officiellement proscrites.

Il serait trop facile de rejeter le blâme sur le seul corps enseignant. En réalité, ce sont des pédagogues et des psychologues qui, les premiers, ont prôné la lecture globale[252]. Dès le XVIII^{e} siècle, le *Dictionnaire pédagogique* de Nicolas Adam (1787) reprend les thèses de l'abbé de Radonvilliers, selon lesquelles l'apprentissage syllabique « tourmente » les enfants pour leur faire « retenir un grand nombre de lettres, de syllabes et de sons où ils ne doivent rien comprendre » alors qu'il faudrait les « amuser avec des mots entiers » écrits sur des cartes à jouer. À la fin du XIX^{e} siècle, dans son laboratoire américain de psychophysique, James McKeen Cattell annonce avoir découvert que les mots sont reconnus globalement plus rapidement que les lettres qui les composent. Ses travaux sont repris par le psychologue suisse Édouard Claparède, pour qui l'apprentissage de la lecture doit s'appuyer sur la perception naturellement « syncrétique » de l'enfant. Le docteur Ovide Decroly incorpore ces idées dans sa « méthode idéovisuelle » qui connaît un succès officiel en Belgique dans les années 1930, et reçoit l'assentiment de Jean Piaget et surtout d'Henri Wallon, influent professeur au Collège de France où il occupe la chaire de psychologie de l'enfance et de l'éducation de 1937 à 1944. Ministre de l'Éducation nationale, celui-ci élaborera avec Paul Langevin et Henri Piéron, au sortir de la guerre (1947), un ambitieux plan de réforme de l'enseignement.

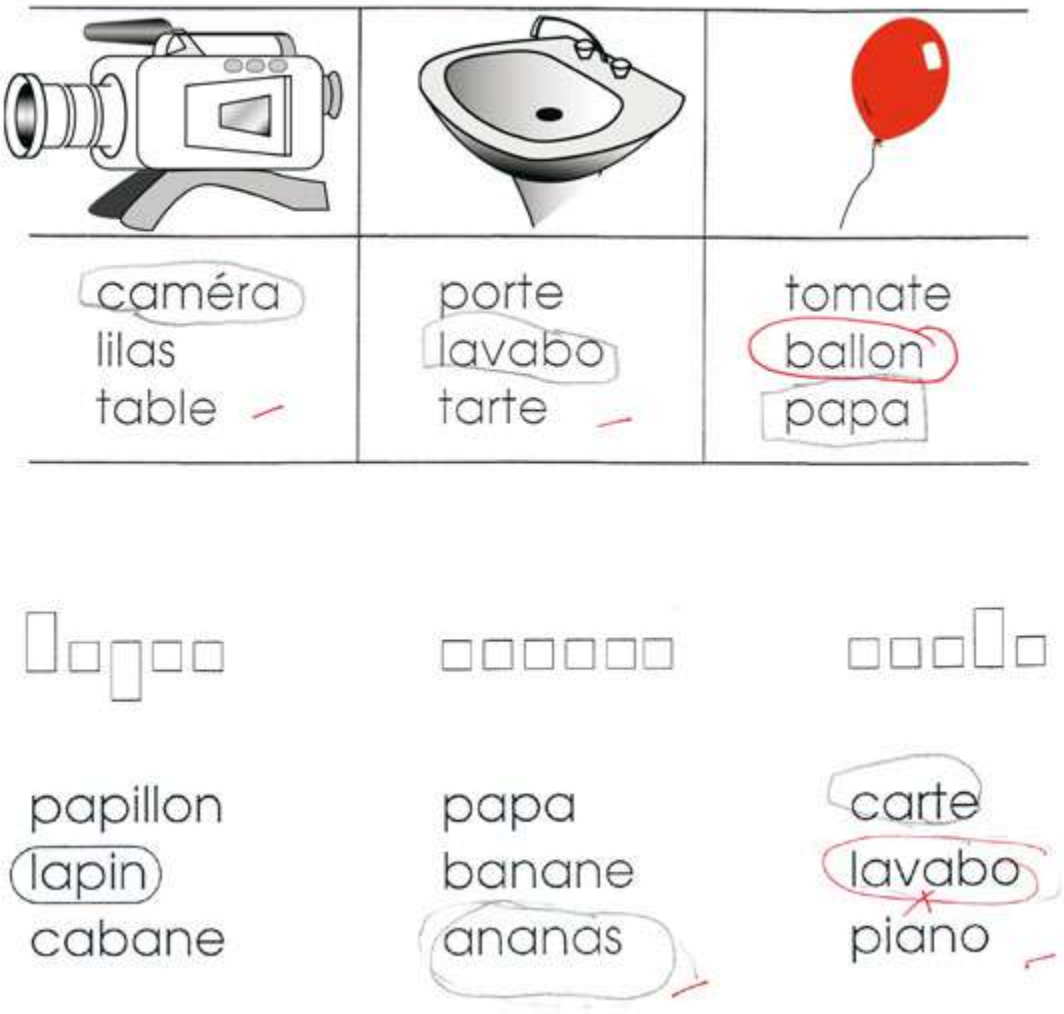


Figure 5.2 En dépit de son inefficacité, la méthode globale d'enseignement de la lecture continue d'inspirer certains exercices de cours préparatoire. Quelques semaines après la rentrée, alors qu'il n'a pas encore appris les sonorités de lettres, l'enfant doit apparier un mot avec une image (en haut). Remarquez l'erreur grossière sur le mot « ballon », qui suggère qu'il ignore tout du principe alphabétique. L'enfant apprend également à prêter attention à la forme globale du mot, symbolisée par l'enveloppe des lettres montantes et descendantes. Notez que l'institutrice elle-même se trompe sur le mot « lavabo » ! Ces exercices n'ont pas le moindre rapport avec la manière dont notre cerveau reconnaît les mots.

Par une autre voie, l'emphase sur la forme globale du mot envahit le monde de la typographie, où un mot spécial, la « bouma » (du nom du psychologue néerlandais Herman Bouma), fait référence au contour des mots. Pour en améliorer la lisibilité, les typographes conçoivent sciemment des polices de caractères qui produisent des « boumas » les plus distinctes possible.

L'illusion d'une lecture globale

Comment des scientifiques et des pédagogues consciencieux sont-ils parvenus à une conclusion aujourd'hui jugée erronée ? Il importe de comprendre, et de réfuter un par un, les arguments scientifiques qui ont conduit à l'idée fausse d'une lecture globale des mots. Un article récent recense au moins quatre observations fallacieuses qui constituent autant de piliers de l'illusion de la lecture globale[253].

1. **Le temps de lecture d'un mot ne dépend pas du nombre de lettres qu'il contient**. Quelle que soit leur longueur (dans un intervalle de 3 à 8 lettres environs), nous mettons autant de temps pour lire les petits mots que les grands. Cette découverte semble accréditer l'idée que la reconnaissance d'un mot ne passe pas par sa décomposition en lettres. Introspectivement, la lecture d'un mot nous paraît une opération élémentaire, immédiate, qui reconnaît la chaîne de lettres comme un tout indivisible. Cependant, nous savons aujourd'hui que cette conclusion ne tient pas. Chez le lecteur adulte, si la longueur des mots n'influence pas la lecture, ce n'est pas parce que notre cerveau ne prête aucune attention aux lettres, mais tout simplement parce qu'il les traite toutes simultanément et non pas une par une. De plus, chez l'enfant, les choses sont bien différentes. Pendant les années d'apprentissage, le temps de lecture est strictement proportionnel au nombre de lettres, et cet effet de longueur met plusieurs années à disparaître. Ainsi, est-il encore plus évident chez l'enfant que la lecture n'est pas globale.

2. **La reconnaissance d'un mot peut être plus rapide ou plus efficace que celle d'une lettre seule**. Cet effet fascinant, découvert par Cattell, a été répliqué par Reicher et popularisé sous le terme d'« effet de supériorité lexicale » ; nous l'avons examiné au chapitre 2 (page 55). Bien que son origine ne soit pas encore bien comprise, il n'est plus, aujourd'hui, considéré comme la preuve que la reconnaissance globale du mot précède l'extraction de ses lettres. Au contraire, des analyses récentes montrent que la lecture d'un mot dans du bruit se déduit directement du taux de reconnaissance de chacune de ses lettres[254]. Si l'on accède plus vite au mot, c'est peut-être que l'attention consciente s'oriente plus aisément vers les niveaux les plus élevés de la hiérarchie corticale, tandis qu'un effort d'attention focale est nécessaire pour accéder à l'identité des lettres (même si celle-ci est calculée en premier[255]). La taille des populations neuronales concernées doit également favoriser la reconnaissance des lettres au sein

des mots : un très grand nombre de neurones, aux niveaux lexical, sémantique et phonologique – différencient « saut » de « sauf », tandis qu'un petit ensemble d'unités visuelles déchargent de façon distincte à la présentation des lettres « t » et « f ».

3. **La lecture des mots en minuscules est légèrement plus rapide que celle des mots en majuscules**. Selon les partisans de la méthode globale, cette rapidité serait due à la forme particulière des minuscules ascendantes et descendantes, qui engendre un contour propre à chaque mot (la « bouma » des typographes). Ce contour disparaît lorsque toutes les lettres apparaissent en majuscules de la même taille. Cependant, si nous utilisions réellement le contour des mots, nous ne devrions pas seulement être ralentis, mais être tout simplement incapables de reconnaître les mots en majuscules. *A fortiori*, la lecture devrait être impossible lorsque les mots sont présentés AvEc DeS LeTtReS MiXtEs, ce qui brise totalement les régularités du contour. Au contraire, tous ces mots restent éminemment lisibles. Comme nous l'avons vu au chapitre 2 (page 86), l'aire sensible aux mots écrits située dans le cortex occipito-temporal gauche généralise très vite des minuscules aux majuscules, y compris de façon non consciente. Le léger ralentissement de la lecture des mots en majuscules n'est donc pas crucial. Il pourrait tout simplement être dû à leur moindre familiarité.

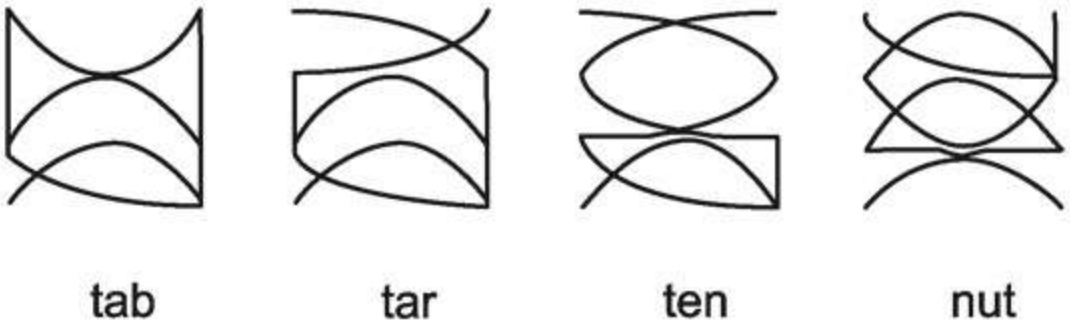
4. **Les erreurs typographiques qui respectent le contour global du mot sont moins faciles à déceler que celles qui le violent**. Ce n'est pas entièrement faux : lorsque le mot désiré est « test », nous détectons moins fréquemment l'erreur d'orthographe « tesf » que l'erreur « tesg », dans laquelle une minuscule ascendante a été remplacée par une descendante. Cependant cet effet ne provient pas de la forme globale du mot. Il s'explique intégralement par la ressemblance des lettres : le « f » de « tesf » ressemble plus à un « t » que le g de « tesg ». L'expérience montre que c'est la similarité des lettres, et non celle du contour global, qui détermine les confusions entre les mots[256].

En résumé, cela ne fait aujourd'hui plus de doute : le contour global des mots ne joue pratiquement aucun rôle dans la lecture. La reconnaissance visuelle des mots ne repose pas sur une appréhension globale de son contour, mais sur sa décomposition en éléments simples, les lettres et les graphèmes. La région corticale de la forme visuelle des mots traite toutes les lettres du mot en parallèle, ce qui, historiquement, est responsable de

l’impression de lecture globale. Mais l’immédiateté de la lecture n’est qu’une illusion, suscitée par l’extrême automatisation de ses étapes, qui se déroulent en dehors de notre conscience.

L’inefficacité de la méthode globale

L’inefficacité de la méthode globale d’enseignement de la lecture est confirmée par l’expérimentation directe. Plusieurs chercheurs ont comparé l’enseignement de l’orthographe selon une méthode soit globale, soit analytique. L’une des plus belles expériences a été réalisée par mon ami Bruce McCandliss, professeur à l’Institut Sackler de New York[257]. Il a inventé un nouvel alphabet artificiel d’un style inhabituel. Celui-ci s’écrit de bas en haut, à l’aide de lettres dont les traits et les courbes se touchent, de sorte que leurs courbes forment un contour global continu. Voici quatre mots écrits dans cet alphabet :



Sans en être informé, on ne se rend pas nécessairement compte qu’il s’agit de mots de trois lettres – mais remarquez par exemple la lettre « t », qui revient quatre fois dans cet exemple.

Une fois qu’il eut mis au point cet alphabet, Bruce McCandliss proposa à deux groupes d’étudiants d’apprendre à lire ces mots. Aux uns, il demanda d’en mémoriser la forme globale, sans les prévenir de la présence de lettres, tandis qu’aux autres il signala que les mots à retenir étaient composés d’une séquence de lettres écrites de bas en haut.

Examinons pas à pas les conséquences de cette simple différence de présentation. Après un jour d’entraînement sur une première liste de trente mots, le groupe qui prêtait attention à leur forme globale les reconnaissait *mieux* que celui qui tentait d’extraire les lettres. Ce résultat s’accorde bien à

l’intuition de nombreux enseignants, qui affirment que la méthode globale est plus facile pour l’enfant, du moins au départ. Mais cela n’est vrai que pour les vingt ou trente premiers mots. L’identification des lettres et des graphèmes demande initialement plus d’efforts, mais les bénéfices en sont vite évidents.

Dès le deuxième jour, lorsque Bruce McCandliss demanda aux étudiants d’apprendre une deuxième liste de mots, ceux qui faisaient attention à la forme globale commencèrent à perdre pied. Ils apprirent les nouveaux mots – mais au détriment de leurs performances sur la première liste, qu’ils oublièrent rapidement. Il en alla ainsi à chaque fois qu’une nouvelle liste de mots fut introduite : il leur fallait toujours repartir de zéro, et ils perdaient le peu qu’ils avaient appris la veille. Quoi de plus normal, puisqu’ils essayaient d’apprendre ces mots un par un, comme s’il s’agissait de caractères chinois – une tâche extraordinairement difficile dès lors que le nombre de mots dépasse quelques dizaines et qu’ils se ressemblent tous.

Au contraire, ceux qui prêtaient attention aux lettres progressaient lentement, mais sûrement. Chaque jour, leur taux de réussite s’accroissait. Non seulement ils parvenaient d’emblée à déchiffrer certains des mots nouveaux qu’on leur proposait ; mais, de plus, leurs performances s’amélioraient également pour les mots les plus anciens qu’ils n’avaient pourtant jamais révisés. Ce n’était que logique : leur connaissance croissante des lettres leur permettait de déchiffrer ces mots de plus en plus aisément, même s’ils ne se rappelaient plus les avoir vus.

Mais c’est l’imagerie cérébrale qui mit en évidence l’effet le plus spectaculaire : l’hémisphère *droit* s’activait pour la lecture globale, alors que l’attention portée aux lettres activait bien la région classique de la lecture, l’aire occipito-temporale ventrale gauche. Autrement dit, l’apprentissage par la méthode globale mobilisait un circuit inapproprié, diamétralement opposé à celui de la lecture experte.

L’expérience de McCandliss met en évidence deux limites majeures de la méthode globale. Premièrement, la simple exposition aux mots écrits, sans apprentissage explicite des correspondances graphème-phonème, ne suffit pas toujours à découvrir les régularités de l’orthographe, en tout cas pas de façon systématique et rapide. Même après avoir été exposé à des milliers de mots écrits, un adulte non prévenu peut très bien ne jamais se

rendre compte que ces mots sont composés à l'aide d'un système régulier de signes[258].

Seconde limite, la méthode globale ne permet pas de généraliser la procédure de lecture à des mots nouveaux. Or cette généralisation joue un rôle essentiel dans l'apprentissage de la lecture chez l'enfant. Aucun enseignant ne peut espérer présenter à l'enfant tous les mots du français ! Savoir lire, c'est avant tout savoir décoder des milliers de mots nouveaux, que l'on rencontre pour la première fois dans un livre, et dont il faut déduire la prononciation. Pour progresser en lecture, l'enfant doit donc s'« autoenseigner » – il lui faut savoir déchiffrer de lui-même les chaînes de caractères nouvelles afin d'y reconnaître des mots dont il connaît déjà la prononciation et le sens, et d'automatiser progressivement l'ensemble de cette chaîne de traitement[259].

Ce point est capital, car il réfute l'argument selon lequel la méthode globale accroîtrait la liberté et l'autonomie des enfants. Paradoxalement, l'apprentissage explicite des correspondances graphèmes-phonèmes est le seul à offrir à l'enfant la liberté de lire, car lui seul donne accès à de nouveaux mots. On a bien tort d'opposer la liberté de l'enfant à l'effort et à la rigueur de l'enseignement. Conquérir sa liberté de lecteur demande certes à l'enfant des efforts, mais ceux-ci sont rapidement payés en retour lorsqu'il découvre, pour la première fois, qu'il parvient à lire des mots qu'il n'a jamais appris en classe.

Cependant, je ne voudrais pas donner l'impression que le rejet de la méthode globale repose seulement sur des expériences de laboratoire ou des arguments théoriques. Son inefficacité est également prouvée par l'expérimentation en grandeur nature. Tirant parti de la variabilité des méthodes d'enseignement, la psychologie de la lecture a bénéficié d'expérimentations dans les écoles. Ces recherches, qui empruntent leurs méthodes à l'épidémiologie autant qu'à la psychologie de l'éducation, ont mesuré les performances de lecture des enfants dans des tests standardisés, en fonction de la méthode d'enseignement employée, mais aussi du niveau socio-économique, de l'âge et d'autres variables.

Leurs résultats[260], tant en France qu'à l'étranger, conduisent à une conclusion ferme : les approches fondées sur la forme globale du mot et sa mise en liaison directe avec un sens ne fonctionnent pas aussi bien que la mise en liaison systématique des lettres avec les sons. Quelle que soit leur

origine sociale, les élèves dont l'attention n'est pas attirée sur le codage des lettres et des graphèmes souffrent d'un retard de lecture non négligeable et qui persiste pendant plusieurs années, même s'il finit ensuite par disparaître.

Point crucial : contrairement aux affirmations des « globalistes », à la fin de la scolarité, les enfants qui ont appris avec une méthode globale sont, non seulement moins performants dans la lecture de mots nouveaux, mais également moins rapides et moins efficaces en compréhension de textes. Voilà qui réfute l'idée que les méthodes grapho-phonologiques transforment l'enfant en machine à ânonner, incapable de prêter attention au sens. En réalité, décodage et compréhension vont de pair : les enfants qui savent le mieux lire des mots et des pseudo-mots isolés sont aussi ceux qui comprennent le mieux le contenu d'une phrase ou d'un texte. Bien entendu, apprendre à ânonner la prononciation des mots ne saurait constituer une fin en soi. Il est bon que la plupart des livres scolaires, aujourd'hui, fassent très vite appel à des petits textes signifiants plutôt qu'à des lignes de charabia sur le « tutu de Lola ». Mais la compréhension passe avant tout par la fluidité du décodage. Plus vite cette étape est automatisée, mieux l'enfant peut se concentrer sur le sens du texte.

Comment enseigner la lecture ?

Que recommander, en définitive, aux enseignants ou aux parents qui souhaitent optimiser l'enseignement de la lecture ? L'étape charnière de la lecture, c'est le décodage des graphèmes en phonèmes, c'est le passage d'une unité visuelle à une unité auditive. C'est donc sur cette opération que doivent se focaliser tous les efforts.

Dès son plus jeune âge, des jeux simples prépareront l'enfant à la lecture, tant sur le plan phonologique en lui faisant manipuler les sons du langage (rimes, syllabes, phonèmes), que sur le plan visuel en lui faisant reconnaître, mémoriser et tracer la forme des lettres. Dès ce stade, qui peut avoir lieu à l'école maternelle, on aura soin d'orienter très soigneusement les lettres afin qu'il soit clair pour l'enfant que chaque lettre se lit dans une orientation fixe, et qu'un b, un p, un d ou un q sont donc des formes différentes. Les écrire ou les tracer du doigt contribue certainement à franchir avec succès cette étape importante.

Le moment venu, dès le début du cours préparatoire, les correspondances entre graphèmes et phonèmes devront être enseignées d'une façon tout à fait explicite, et sans craindre de se répéter. On ne peut supposer que l'enfant finira par les acquérir à force de voir de nombreux mots. Il faut expliquer clairement à l'enfant que chaque son a ses « costumes », les lettres ou groupes de lettres qui peuvent le dépeindre, et qu'à l'inverse chaque lettre se prononce d'une ou de plusieurs manières possibles. Bien entendu, les graphèmes seront introduits dans un ordre logique : on commencera par les plus simples et les plus réguliers, ceux qui se prononcent presque toujours de la même manière, comme le « t » ou le « a », pour incorporer ensuite progressivement, un par un, les graphèmes plus rares (« b », « m », « n »), irréguliers (« s », « g »), muets (« e »), ou complexes (« ou », « on », « oi », « ch »). On attirera l'attention sur la présence de ces suites de lettres à l'intérieur des mots, par exemple en les coloriant ou en les déplaçant pour former de nouveaux mots. On fera également bien comprendre que les lettres d'un mot s'enchaînent dans un ordre précis, toujours de la gauche vers la droite, sans qu'une seule puisse être laissée de côté. Si nécessaire, on pourra couvrir le mot d'une fenêtre coulissante, afin que n'apparaissent qu'une ou quelques lettres à la fois. Enfin, toute cette mécanique de la lecture doit mener au sens. On ne cachera donc pas à l'enfant que le but de la lecture, c'est de comprendre, et non d'ânonner des syllabes. Chaque acte de lecture devra mener à des mots ou des phrases compréhensibles de l'enfant, que celui-ci peut résumer ou paraphraser.

Bien des maîtres ne verront là que des évidences, déjà utilisées en pédagogie depuis des décennies. Pourtant, l'expérience montre que les rendre explicites ne peut qu'aider les enseignants. Je me souviens d'un logiciel de lecture, soi-disant primé, dont le tout premier mot proposé à l'apprenti lecteur était le mot « oignon », peut-être l'un des plus irréguliers de la langue française… Des erreurs aussi ridicules montrent que les principes de la lecture sont encore loin d'être évidents pour tous !

Sans doute est-il plus important encore de souligner ce qu'il ne faut pas faire. Dessiner le contour global des mots n'est d'aucune utilité, de même qu'attirer l'attention de l'enfant sur le fait que certaines lettres montent ou descendent. Ces exercices pourraient même nuire dans la mesure où ils risquent d'entraîner l'enfant à prêter attention, soit à la forme globale du

mot, soit à quelque détail de son contour, ce qui lui laisserait accroire que l'on peut deviner le mot sans l'analyser. Le contour des mots « deux » et « doux » est presque identique – l'enfant doit comprendre au plus vite que ce n'est qu'en analysant précisément les lettres qu'ils contiennent que l'on peut les lire.

C'est pour la même raison – ne pas distraire l'attention de l'enfant du niveau des lettres – que je me méfie des manuels de lecture trop beaux, émaillés de plus d'images que de textes. Attention également aux posters figés, accrochés dans la classe durant toute l'année, et où les mots apparaissent toujours à la même place. Il y a grand danger que certains enfants, souvent les plus brillants, apprennent par cœur les positions fixes des mots ou l'allure de chaque page. Il n'est pas rare qu'un enfant donne ainsi l'illusion de savoir lire, non seulement à son entourage, mais également à lui-même, ce qui est bien pire. L'image détourne également l'attention du texte. Dans un monde où domine le zapping, l'enfant n'apprend plus guère à soutenir son attention pendant de longues périodes. Sans doute n'est-il pas inutile de lui présenter des textes sobres, si possible écrits au tableau devant lui, et de lui rappeler que la lecture exige un effort qui porte sa propre récompense, la compréhension du message codé.

Il convient également de se garder d'aller trop vite. À chaque étape de l'apprentissage de la lecture, les mots et les phrases proposés à l'enfant ne doivent faire appel qu'aux seuls graphèmes et phonèmes qui lui ont été explicitement enseignés. Une leçon de lecture ne s'improvise donc pas – pas question pour l'enseignant d'inventer, le jour même, quelques phrases au hasard, car celles-ci auraient toutes les chances de s'écarter de ce que l'enfant a appris.

Parce que nous sommes devenus des lecteurs experts, nous sous-estimons systématiquement la difficulté de la lecture. Disséquons donc, lettre par lettre, les exemples que nous proposons aux jeunes lecteurs jusqu'à en éliminer toutes les difficultés, à l'exception de celle que l'on souhaite enseigner. Attention donc aux « e » muets, aux lettres doubles, aux terminaisons spéciales comme le suffixe « -tion »… Toutes ces difficultés peuvent faire décrocher les enfants et leur donner à penser que la lecture est le royaume de l'arbitraire. En tant que scientifique et enseignant moi-même, je souhaiterais que les instituteurs et institutrices à qui je confie mes enfants

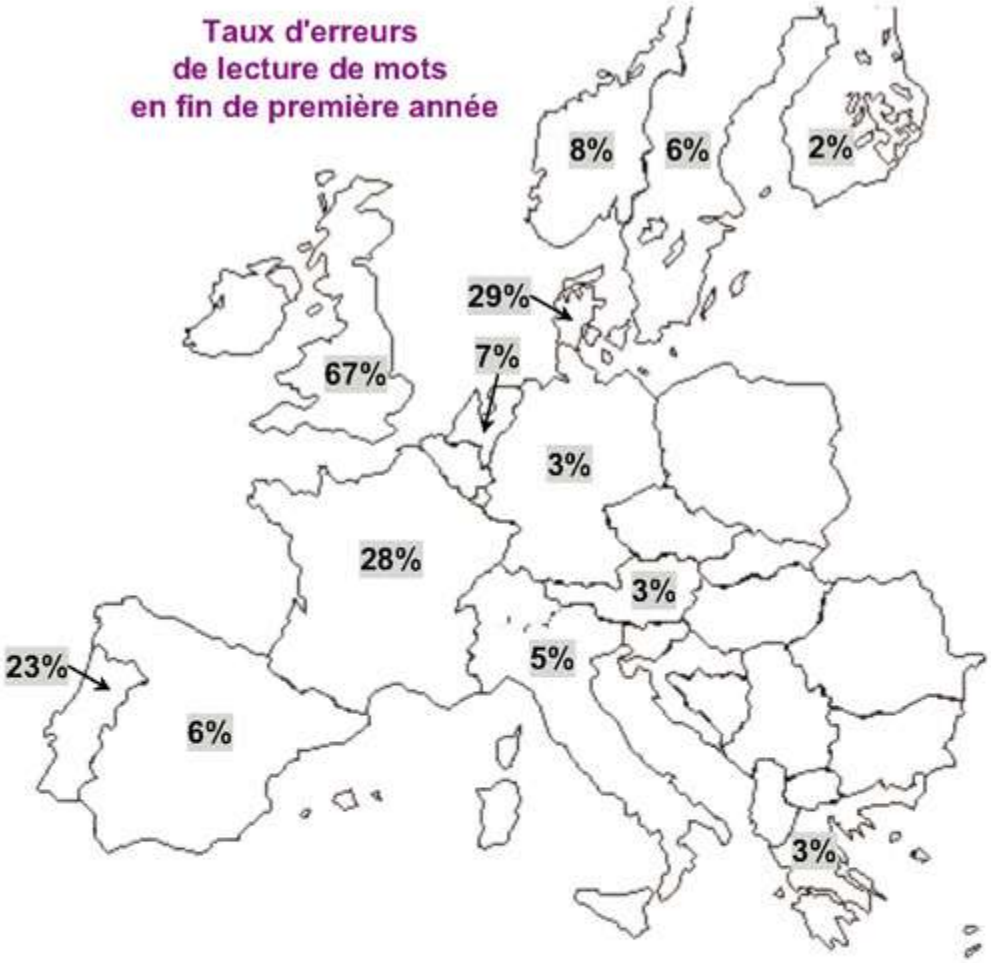
apportent à leur pédagogie le même soin obsessionnel que mes collègues et moi apportons à la conception d'une expérience de psychologie.

Enfin, ne cédons pas au découragement si nos enfants éprouvent des difficultés à lire. L'apprentissage de la lecture ne présente pas la même difficulté dans tous les pays. Or le français fait partie des langues les plus difficiles à lire et à orthographier. Nous avons vu que sa transparence orthographique est faible : à chaque lettre peuvent correspondre de multiples sons, et nombreuses sont les exceptions. Les comparaisons internationales montrent que cette variable a un impact majeur[261]. Un enfant finlandais ou italien, en quelques mois, sait lire n'importe quel mot de sa langue, car celle-ci ne souffre pratiquement d'aucune irrégularité. Il ne fera pas de dictée ni n'apprendra à épeler les mots, car ces activités n'ont aucun sens dans ces langues : une fois que l'on a compris comment se prononce chaque graphème, on sait lire et écrire tous les sons. À l'inverse, les enfants français, danois et surtout anglais mettront plusieurs années à converger vers une lecture efficace. Même à 9 ans, un enfant français ne lit pas aussi bien qu'un petit Espagnol de 7 ans, et il faut près de deux ans d'enseignement supplémentaire pour qu'un petit Anglais atteigne enfin le niveau de lecture d'un enfant français (figure 5.3).

La réforme de l'orthographe française ou anglaise n'étant pas pour demain, il ne reste qu'à nous résigner, faire pratiquer sans relâche la lecture aux enfants, enseigner patiemment chacune des exceptions de notre belle langue… et songer que la situation pourrait être bien pire : les enfants chinois ne passent-ils pas la majeure partie de leurs jeunes années à apprendre de nouveaux caractères ? Leur situation est d'autant plus paradoxale que bon nombre d'entre eux apprennent, en quelques mois, un alphabet très simple, le pinyin, qui leur sert ensuite à noter la prononciation des caractères traditionnels[262].

L'enseignant du français devra bien garder à l'esprit que cette longue période d'apprentissage de la lecture n'est pas inutile. Qu'il songe simplement à l'intense bouillonnement neuronal dont le cerveau de l'enfant est le siège. Chaque apprenti lecteur doit mettre en place, dans la région ventrale de son hémisphère gauche, toute une hiérarchie de neurones codant pour les lettres, les bigrammes, les graphèmes et les morphèmes. Qu'on le veuille ou non, cette hiérarchie est bien plus complexe en anglais ou en français que dans des langues comme l'italien, où la mise en place des

lettres suffit à débuter. La quantité de recyclage neuronal que demande notre langue est impressionnante. Enseignons donc patiemment, et même longtemps après le cours préparatoire, chacun des pièges du français – ceux-ci sont si nombreux !



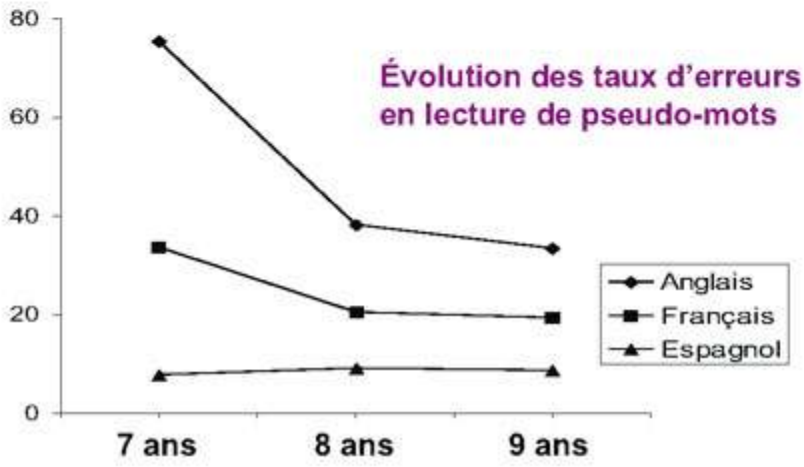


Figure 5.3 Les langues européennes ne sont pas égales devant l'apprentissage de la lecture. Les taux d'erreurs en lecture de mots très familiers ont été mesurés après une année d'apprentissage dans 15 pays européens (en haut, données de Seymour et coll., 2003, table 5). Les enfants finlandais, allemands, grecs, autrichiens et italiens, dont l'orthographe est transparente, sont déjà d'excellents lecteurs. À l'autre extrême de l'échelle, les Anglais ne savent lire qu'un mot sur trois. Les écoliers français ont des performances intermédiaires. Ces inégalités se retrouvent année après année, particulièrement dans la lecture de pseudo-mots tels que « balige » ou « chitre », que seule la procédure de décodage graphème-phonème permet de lire (en bas, données de Goswami et coll., 1998, table 8). Il faut une ou deux années d'apprentissage supplémentaires à un écolier anglais pour atteindre le niveau de lecture d'un écolier français.

Je crois vital, enfin, que chaque enseignant connaisse, ne fût-ce que de loin, les mécanismes du cerveau de l'enfant. Si vous avez, comme moi, passé quelques heures de votre vie à corriger des programmes d'ordinateur fautifs, ou à réparer un programmateur de machine à laver, vous savez bien qu'une grande part de la difficulté consiste à bien se représenter ce que fait la machine. Il faut imaginer l'état dans lequel elle se trouve afin de comprendre comment elle interprète les signaux qu'on lui transmet et d'identifier les interventions qui l'amèneront dans l'état désiré.

Or le cerveau de nos enfants est une formidable petite machine à apprendre. Chaque journée passée à l'école modifie un nombre vertigineux de synapses. Des préférences basculent, des stratégies nouvelles émergent, des automatismes s'établissent, des réseaux nouveaux se parlent. Je suis persuadé qu'en comprenant mieux ces transformations, les enseignants parviendront à concevoir, avec l'aide des psychologues, de nouvelles stratégies plus efficaces pour chaque enfant. Certes, la pédagogie ne sera jamais une science exacte. Pourtant, parmi l'infinité de manières d'alimenter un cerveau en mots, certaines sont bien meilleures que d'autres. À chaque enseignant d'expérimenter avec soin et rigueur afin d'identifier, jour après jour, les stimulations optimales dont se nourriront ses élèves.

Chapitre 6
Le cerveau dyslexique

Certains enfants, en dépit d'une intelligence et d'une éducation normales, éprouvent de grandes difficultés à lire. D'où provient ce déficit ? Dans la majorité des cas, la dyslexie est liée à un défaut de manipulation mentale des phonèmes. Le cerveau des enfants dyslexiques présente plusieurs anomalies caractéristiques : l'anatomie du lobe temporal est désorganisée, sa connectivité est altérée, son activation au cours de la lecture est insuffisante. Une forte composante génétique est impliquée et quatre gènes de susceptibilité ont été identifiés. On soupçonne qu'ils affectent la mise en place des neurones du cortex temporal au cours de la grossesse.

Ces anomalies impliquent-elles que la dyslexie est incurable ? Pas du tout. De nouvelles stratégies de rééducation apportent un grand message d'espoir : fondées sur un apprentissage intensif par ordinateur, elles améliorent les scores de lecture et conduisent à une normalisation partielle de l'activité cérébrale des enfants dyslexiques.

« Madame Everett apporta un livre qui s'appelait *Lire sans larmes*. Dans mon cas, son titre n'était certainement pas justifié. […] J'étais, dans l'ensemble, énormément découragé par ma scolarité. […] Ce n'était pas agréable de se sentir totalement dépassé et laissé pour compte dès le début de la course. »

Winston CHURCHILL[263]

Tous les enseignants de l'école primaire, quels que soient leur talent et leur dévouement, ont rencontré un jour un « vilain petit canard » : un enfant qui paraît vraiment différent des autres, tant il semble incapable d'apprendre à lire. Il se peut que son intelligence soit vive, voire au-dessus de la moyenne dans les activités mathématiques ou pratiques. Mais, lorsqu'il s'agit de lire, il devient d'une incroyable maladresse, bute sur chaque syllabe, mélange les sons, devine sans réfléchir, se décourage… et décourage également son entourage. Une visite chez l'orthophoniste conduira, par le biais de quelques tests de lecture de pseudo-mots ou de vitesse de lecture, à un diagnostic bien connu et toujours redouté des parents : celui de dyslexie.

Quels mécanismes cérébraux se cachent donc derrière ce terme familier ? Les avancées de la science de la lecture permettent-elles de comprendre sur quel écueil butent ces enfants ? S'agit-il d'un simple « blocage psychologique », si tant est que ce terme ait un sens, ou bien d'une authentique pathologie cérébrale ? Quelles aires, quels neurones, voire quels gènes sont impliqués ? Et quelles thérapies peut-on envisager ?

Dans ce chapitre, nous parcourrons ensemble trente ans de recherches sur la dyslexie, qui ont conduit d'une définition purement psychologique à des études d'imagerie, d'anatomie et de génétique, pour s'achever par la conception de logiciels spécialisés dans la rééducation de ce handicap si

fréquent. L'identification des facteurs de risque de la dyslexie, la détermination de leurs bases génétiques, le pointage des chromosomes et des gènes concernés, la compréhension des mécanismes biologiques qu'ils contrôlent, constituent un magnifique chapitre de la recherche sur le cerveau humain – un chapitre toujours en cours d'écriture puisque, dans les dernières années, pas un mois ne s'est écoulé sans que n'apparaisse quelque nouvelle découverte sur la génétique ou les bases cérébrales de la dyslexie.

Qu'est-ce que la dyslexie ?

La définition de la dyslexie prend en compte sa singularité même. Il s'agit d'une difficulté disproportionnée d'apprentissage de la lecture, qui ne peut s'expliquer ni par un retard mental, ni par un déficit sensoriel, ni par un environnement social ou familial défavorisé. Une conséquence importante de cette définition est que tous les mauvais lecteurs ne sont pas des dyslexiques. Une surdité mal dépistée, un retard mental, de mauvaises conditions d'éducation, ou tout simplement la complexité des règles de l'orthographe peuvent expliquer que de nombreux enfants éprouvent des difficultés à apprendre à lire. Ce n'est qu'une fois toutes ces causes éliminées que l'on parlera de dyslexie au sens strict.

On estime qu'entre 6 et 8 % des enfants français de CE1 souffrent de dyslexie[264]. Bien que ce chiffre soit effroyablement élevé, il faut comprendre qu'il revêt une part d'arbitraire, car il est entièrement dépendant du seuil que l'on choisit pour définir la lecture « normale ». En effet, au sein d'un grand groupe d'enfants, les scores aux tests de lecture forment une parfaite courbe en cloche[265]. Si cette courbe avait présenté deux pics, l'un pour les scores normaux, l'autre pour les scores faibles, il aurait été facile de définir objectivement une population d'enfants dyslexiques. Cependant, la courbe ne présente qu'un seul pic en son centre – il est donc malaisé de placer une frontière qui sépare, de façon non arbitraire, les enfants normaux des dyslexiques. La réalité, c'est que les facilités d'apprentissage de la lecture forment un continuum, depuis l'enfant à qui tout semble facile jusqu'au milieu de classe qui suit normalement, et enfin aux élèves à la traîne dont les difficultés sont plus ou moins sévères. Les pourcentages de prévalence de la dyslexie ne reflètent donc que la barre que l'on décide de placer plus ou moins haut en fonction des conséquences

sociales du déficit. On estime, à raison, que les enfants dont les scores de lecture descendent sous la barre des 5 à 10 % éprouveront des difficultés dans un monde qui exige une maîtrise toujours plus grande de l'écrit.

Est-ce à dire, pour autant, que la dyslexie est une pure construction sociale, un mythe lié à la surmédicalisation de notre société ? Certainement pas. De nombreux indices militent en faveur d'une origine cérébrale de ce handicap. Depuis les années 1950, on a observé chez certaines familles « à risques » une grande proportion d'enfants dyslexiques. De vastes études de génétique comportementale, menées notamment à l'Université du Colorado par John DeFries et ses collaborateurs chez plusieurs centaines de familles, ont confirmé la grande héritabilité des compétences liées à la lecture. Elles ont notamment montré que les vrais jumeaux (monozygotes) présentent des scores bien plus étroitement corrélés que ceux des faux jumeaux (dizygotes) de même sexe. Au sein d'une même fratrie, si l'un des membres est frappé de dyslexie, la probabilité que l'un de ses apparentés directs souffre de la même pathologie est de l'ordre de 50 %.

On s'accorde aujourd'hui à penser que la dyslexie, dans la majorité des cas, possède de fortes bases génétiques, mais n'est pas une maladie monogénique, c'est-à-dire liée à la mutation d'un seul gène. Un faisceau de facteurs de risque et un bouquet de gènes conspirent probablement à perturber l'apprentissage de la lecture. Ne soyons pas surpris que tant de gènes interviennent dans cette compétence culturelle. La lecture experte dépend d'une heureuse combinaison de connexions que nous avons la chance de posséder d'emblée dans nos cerveaux de primates, et d'années d'apprentissage scolaire qui viennent recycler ces circuits en vue de leur nouvel usage. Que quelques grains de sable viennent se glisser dans cette mécanique neuronale, et ce fragile processus de recyclage, déjà difficile pour tous les enfants, peut devenir chez certains source de très grande souffrance.

Perturbations phonologiques

Quelle est la nature exacte du trouble qui affecte les enfants dyslexiques ? En dépit de très nombreuses recherches, un consensus commence seulement à émerger de la littérature scientifique. De nombreux

résultats pointent vers le rôle essentiel d'anomalies fondamentales du traitement phonologique[266].

Les premières pages de cette recherche s'écrivent dès les années 1970. Bien que l'objectif de la lecture soit de comprendre des textes écrits, il apparaît rapidement que les problèmes de la plupart des dyslexiques sont issus d'un niveau plus fondamental, celui du mot. Dès qu'on leur demande de lire des mots isolés, des erreurs et un ralentissement sévère apparaissent. Tous les enfants qui présentent ces problèmes de reconnaissance des mots éprouvent également, cela n'est guère surprenant, des difficultés de compréhension des phrases et des textes. C'est ainsi que les hypothèses les plus complexes, qui liaient la dyslexie à des anomalies du mouvement des yeux sur la page, ou à une mauvaise utilisation du contexte sémantique ou syntaxique des mots dans la phrase, ont progressivement disparu, laissant place à un intérêt grandissant pour les mécanismes de la reconnaissance d'un mot unique.

Les découvreurs de la dyslexie, au début du XX^{e} siècle – Morgan, Hinshelwood, Orton –, l'envisageaient comme une pathologie fondamentalement visuelle, une « cécité congénitale aux mots ». Selon eux, le système visuel des dyslexiques mélangerait et confondrait les lettres, particulièrement celles qui se ressemblent en miroir, comme « b » et « p » ou « b » et « d ». Le grand public semble toujours adhérer à cette hypothèse, qui n'est d'ailleurs pas toujours dépourvue de pertinence (nous y reviendrons au prochain chapitre). Toutefois, les chercheurs ne lui attribuent plus autant d'importance que par le passé. L'attention s'est déplacée vers le rôle du décodage phonologique. La grande majorité des enfants dyslexiques souffre en effet d'un déficit particulier dans la conversion des signes de l'écriture en sons du langage. C'est pourquoi la lecture de pseudo-mots constitue l'un des meilleurs tests qui séparent les enfants en difficulté des élèves normaux. Même après des années d'apprentissage, certains enfants butent sur des chaînes nouvelles telles que « trostaline » ou « lachave ». S'ils parviennent à les lire, leurs temps de réponse les trahissent : plus de 300 millisecondes par lettre, c'est-à-dire presque autant que certains adultes alexiques atteints de lésions du cortex temporal inférieur[267].

La dyslexie serait donc un trouble de la lecture des textes, causé par un problème au niveau des mots, lui-même causé par des difficultés dans la

conversion des graphèmes en phonèmes… Peut-on pousser l'analyse un cran plus loin ? La communauté scientifique s'accorde aujourd'hui à penser que les troubles de conversion graphème-phonème eux-mêmes dérivent d'une source plus fondamentale. La majorité des enfants dyslexiques souffre de troubles du traitement des phonèmes et de la conscience phonémique. C'est, dans une certaine mesure, une révolution intellectuelle : un déficit qui semble restreint à la lecture serait, en réalité, engendré par de subtils déficits de l'analyse des sons du langage parlé.

Cette conclusion en apparence improbable se fonde pourtant sur tout un faisceau d'indices convergents. Par rapport aux enfants dont le développement est normal, les enfants dyslexiques présentent des différences très prononcées aux tests de conscience phonémique qui évaluent la sensibilité aux rimes, la segmentation en phonèmes, ou la recombinaison des sons du langage[268].

Beaucoup de ces études posent certes un problème de circularité : dans la mesure où la conscience phonémique elle-même se développe avec l'apprentissage de la lecture et du principe alphabétique (nous avons vu qu'elle est peu développée chez les analphabètes), il devient bien difficile de séparer les causes et les conséquences[269]. Les enfants sont-ils mauvais en lecture parce qu'ils ne manipulent pas bien les phonèmes ? Ou bien, à l'inverse, ont-ils une mauvaise conscience phonémique parce qu'ils n'ont pas encore reçu les bénéfices de l'alphabétisation ? Un cercle vicieux semble se refermer sur les enfants atteints de dyslexie.

On peut toutefois dépasser cette circularité en réalisant des études longitudinales qui suivent les mêmes enfants sur plusieurs années. Ces études indiquent que, dès le plus jeune âge, la mesure précoce des compétences phonologiques permet de prédire les scores ultérieurs de lecture. Une étude longitudinale particulièrement remarquable a été menée en Finlande[270]. Heikki Lyytinen et ses collègues sont parvenus à suivre des enfants dyslexiques depuis la naissance – ce qui n'est pas sans poser un paradoxe, puisque, à cet âge, bien malin qui pourrait dire si un enfant souffre de troubles de la lecture ! L'astuce a consisté à interviewer, bien avant la naissance, près de 410 futurs parents afin de déterminer dans quelle mesure ils présentaient un risque familial de dyslexie. Les enfants à naître ont ainsi été classés en deux catégories, le groupe à risque et le groupe contrôle, d'environ une centaine d'enfants chacun.

Ces enfants ont ensuite été suivis par des examens réguliers, tous les six mois environ. Après sept ans, lorsqu'ils atteignirent l'âge normal de l'apprentissage de la lecture en Finlande, on constata que certains (mais pas tous) éprouvaient effectivement de grandes difficultés. On remarqua alors que certains indices, dès la première année de vie, permettaient d'anticiper qui allait éprouver des difficultés de lecture. Tel était le cas d'un test de discrimination auditive des phonèmes chez le bébé. En finnois, la différence entre *ata* (consonne courte) et *atta* (consonne longue) définit une frontière catégorielle entre mots. Or la détection de ce contraste phonétique était moindre dans le groupe à risque. Ces bébés avaient besoin qu'on leur présente une consonne de durée plus longue avant qu'ils ne repèrent la différence. L'enregistrement des potentiels évoqués montrait également une différence entre groupes dans la région temporale gauche, prédictive des difficultés ultérieures de lecture.

Ainsi se tisse un lien étroit entre les compétences phonologiques précoces et le bon apprentissage de la lecture. Les enfants dyslexiques semblent souffrir avant tout d'une représentation imparfaite des sons du langage, qui introduit un flou dans la représentation des mots parlés et gêne leur appariement avec les signes écrits. Chez certains enfants, le déficit linguistique est si manifeste que le diagnostic change : le neuropédiatre ne parlera plus simplement de dyslexie, mais de dysphasie ou de troubles généralisés de la parole et du langage. Ce changement de terminologie ne doit pas faire illusion, car la majorité de ces enfants éprouvent de grandes difficultés de lecture.

Mais la question la plus importante se pose en sens inverse : les enfants dyslexiques souffrent-ils toujours de déficits de perception des sons de parole, voire de troubles fondamentaux de la perception auditive ? Bien que cette question demeure très controversée, plusieurs études suggèrent que, chez la majorité des enfants dyslexiques, la réponse est positive. Ainsi la perception catégorielle des sons de parole est-elle fréquemment altérée[271] – les enfants éprouvent des difficultés à détecter la très petite différence temporelle qui distingue un *ba* d'un *pa*, particulièrement en présence de bruit. Parfois, le déficit s'étend à des tâches non linguistiques[272]. La discrimination des fréquences de tons purs, la détection d'une brève interruption dans du bruit, et tout particulièrement la perception de l'ordre des stimuli rapides peuvent être fortement anormales et corréler étroitement

avec les scores de lecture. La perception visuelle de l'ordre temporel peut également être altérée. Enfin, des déficits visuels plus fondamentaux encore ont été observés dans la perception du mouvement ou du contraste[273].

Le problème, bien entendu, c'est que ces déficits sensoriels pourraient n'accompagner la dyslexie que par hasard, simplement parce que leur pathologie cérébrale s'étend à de multiples domaines. Lesquels jouent vraiment un rôle causal dans l'apprentissage de la lecture ? Cette question divise toujours la communauté scientifique, car il s'avère délicat de trier les causes, les conséquences et les simples corrélations parasites de la dyslexie. Cependant, les troubles de la perception des sons, et tout particulièrement de leur ordre temporel, semblent plus fondamentaux que les autres dans la mesure où leur rééducation entraîne des bénéfices dans le domaine de la lecture. En effet, une équipe finlandaise a conçu un logiciel de rééducation très simple[274]. L'enfant y apprend à jouer à un jeu audiovisuel qui ressemble au célèbre jeu Merlin de notre enfance : on entend une série de sons qui varient en hauteur, en durée et en intensité, et il s'agit de reconnaître quelle forme visuelle la représente le mieux. Par exemple, une série montante peut être associée à une rangée de rectangles placés de plus en plus haut. Après sept semaines d'entraînement, à raison de seulement 10 minutes par jour, deux jours par semaine, les enfants en difficulté de lecture voyaient leurs scores de reconnaissance de mots augmenter nettement plus vite que ceux d'un groupe de contrôle qui ne recevaient pas d'entraînement particulier[275].

Ainsi, l'attention portée aux correspondances audiovisuelles semble-t-elle se transférer à la lecture. On peut voir dans cet entraînement une métaphore de l'apprentissage de la notation musicale. Bien que les études contrôlées sur ce sujet soient très rares, l'apprentissage de la musique semble aussi améliorer la lecture[276].

En dépit de ces succès, la question de savoir si *tous* les enfants dyslexiques souffrent de déficits phonologiques, et si ceux-ci, à leur tour, se réduisent à des déficits sensoriels de bas niveau, reste vivement débattue[277]. Il n'est guère douteux qu'une activité aussi complexe que la lecture résulte de multiples chaînes causales. Ainsi, diverses autres explications aux troubles de la lecture ont été recherchées, soit du côté du cervelet, qui serait responsable de l'automatisation des apprentissages[278], soit du côté d'une désorganisation des neurones de la voie « magno-cellulaire » qui véhicule les informations temporelles rapides visuelles et auditives[279]. Selon ces

théories, le noyau du déficit, dans la dyslexie, dépasserait de beaucoup le simple traitement phonologique : le trouble de lecture ne serait que l'arbre qui cache la forêt des déficits d'automatisation motrice ou de perception des stimuli rapides.

Après avoir testé ces idées, Franck Ramus et ses collaborateurs ont récemment réaffirmé que, quelle qu'en soit la raison biologique ultime, un noyau phonologique est à l'origine de la majorité des dyslexies. Selon eux, il n'est pas rare que les enfants dyslexiques souffrent de déficits concomitants des fonctions motrices, visuelles ou auditives, mais ce n'est pas vrai de tous les enfants, loin de là. Contrairement aux troubles phonologiques, ces troubles additionnels, même s'ils participent à la dyslexie en tant que syndrome médical, ne joueraient vraisemblablement pas un rôle causal central dans les difficultés de lecture[280]. Toutefois, et c'est un point fondamental, Ramus et ses collaborateurs ne nient pas qu'une minorité des dyslexiques (peut-être un quart) présente un déficit visuel prononcé sans trouble phonologique évident[281]. Comme nous le verrons au prochain chapitre, il existe des cas avérés où la cause de la dyslexie se situe bien au niveau visuel.

En définitive, c'est peut-être la recherche même de *la* cause de la dyslexie qui doit être remise en question. Sans doute faudrait-il accepter le problème dans toute sa complexité, sans vouloir nécessairement le réduire à une cause unique. À l'interface entre nature et culture, notre capacité de lire résulte d'un heureux concours de circonstances, dans lequel un bon enseignement joue un rôle tout aussi primordial que la présence préalable de processeurs neuronaux visuels et phonologiques correctement interconnectés. L'hypothèse selon laquelle le cerveau des enfants dyslexiques souffre d'une double fragilisation, au confluent des voies de reconnaissance visuelle invariante et de traitement phonologique du langage parlé, me paraît donc particulièrement plausible. Comme nous allons maintenant le voir, l'imagerie cérébrale soutient l'hypothèse que c'est à ce niveau, dans le truchement des connexions du lobe temporal, que se situe souvent le nœud du problème.

L'universalité de la dyslexie

Les enfants dyslexiques souffrent-ils d'une authentique pathologie cérébrale ? Initialement, il était possible d'en douter. Les neuropédiatres savent bien que, dans de tels troubles spécifiques des apprentissages, les examens d'IRM sont souvent inutiles : à première vue, en l'absence de statistiques poussées, l'anatomie cérébrale des dyslexiques présente généralement une apparence normale. Ainsi les plus sceptiques ont-ils parfois mis cette pathologie sur le compte des enseignants, des parents ou du système socio-éducatif dans son ensemble.

Fort heureusement, les nombreux indices concordants d'une importante héritabilité génétique de la dyslexie ont motivé une recherche plus approfondie de ses mécanismes neuronaux. Grâce à une méthodologie affinée, dans les dix dernières années, les fondements biologiques de la dyslexie sont enfin apparus au grand jour. Mon ami Eraldo Paulesu, chercheur à l'Université de Milan, a coordonné en collaboration avec d'autres collègues français et londoniens l'une des études d'imagerie les plus concluantes[282].

Leur recherche partait d'un paradoxe : il n'y a pratiquement aucun diagnostic de dyslexie en Italie, et cette pathologie est plus rare en France qu'en Angleterre. Ces observations semblent mettre en doute l'universalité et l'origine biologique de ce syndrome. La dyslexie ne serait-elle qu'une étiquette culturelle importée de la médecine anglo-saxonne, et que l'on imposerait à une frange d'enfants qui, pour des raisons liées à l'opacité de l'orthographe et aux conditions de son enseignement, restent en queue de peloton ? Eraldo Paulesu et ses collègues soulignaient que l'on pouvait, tout aussi bien, conclure à l'inverse. Il existerait, dans tous les pays du globe, une fraction d'enfants dont le patrimoine génétique et neurobiologique prédispose à la dyslexie – mais cette maladie universelle se manifesterait de façon plus ou moins évidente selon les cultures. Elle ne deviendrait un problème pédiatrique important que dans les pays dont l'écriture alphabétique est particulièrement opaque et demande un gros effort d'apprentissage grapho-phonologique.

Pour résoudre ce dilemme, Paulesu a activement recherché des adultes italiens qui avaient été particulièrement gênés en lecture au cours de leur scolarité. Après avoir soumis près de 1 200 étudiants à des tests standardisés, il en a retenu 18, tout en bas de l'échelle, qui pouvaient être considérés comme d'authentiques dyslexiques. Superficiellement, leur

lecture était bien meilleure que celle de leurs homologues anglais ou français (ils savaient tous lire), mais relativement aux scores des lecteurs italiens normaux, ils se situaient aussi bas que chacun des autres groupes de dyslexiques par rapport aux sujets contrôles issus de leur propre pays.

Restait à savoir s'il y avait quoi que ce soit de commun dans le cerveau de ces dyslexiques italiens, français et anglais d'apparence si différente. Pour le savoir, Paulesu et ses collègues ont visualisé l'ensemble du réseau cérébral de la lecture, à l'aide de la caméra à positons, tandis que les patients et leurs contrôles lisaient des mots suffisamment simples pour ne pas leur poser de difficultés (la situation de contrôle consistait à regarder des figures géométriques qui ressemblaient aux lettres). La comparaison des dyslexiques avec leurs sujets contrôles a mis en évidence une anomalie très nette. Tout un pan du lobe temporal gauche était trop faiblement activé chez les dyslexiques, et ce au même endroit et à un degré comparable dans les trois pays (figure 6.1). En dépit de variations culturelles de surface, la dyslexie possède donc des mécanismes cérébraux universels, au moins pour les écritures alphabétiques.

Une étude très récente a remis en question ces conclusions en suggérant que le chinois pourrait constituer une exception à la règle[283]. L'IRM suggère que les enfants qui éprouvent des difficultés à apprendre à lire le chinois se caractérisent principalement par la sous-activation d'une tout autre région que celle de Paulesu : la région frontale moyenne gauche. L'anomalie se situe tout près de l'« aire d'Exner » dont la lésion conduit à une agraphie – une incapacité de tracer des lettres et des mots bien formés.

Faut-il pour autant en conclure, comme le font les auteurs de ce travail, que les réseaux de la lecture et de ses pathologies varient radicalement selon les cultures ? Mon impression est que leurs conclusions demandent à être grandement nuancées. En effet, et bien qu'ils ne mettent pas en valeur ce résultat, même dans leur étude on voit une nette sous-activation occipito-temporale ventrale gauche. Elle se situe à moins de 8 millimètres des anomalies communes aux dyslexiques italiens, français et anglais ! L'idée d'un mécanisme universel de la lecture en sort donc renforcée plutôt qu'affaiblie.

Reste alors à expliquer pourquoi on trouve, en plus de cette anomalie commune, une grande différence d'activation frontale présente uniquement chez les dyslexiques chinois. Il semble que la difficulté, lorsque l'on

apprend à lire en chinois, ne réside pas tellement au niveau phonologique, mais plutôt dans la mémorisation d'au moins trois mille caractères distincts. Pour s'aider, les petits Chinois utilisent une mémoire motrice du tracé des caractères. On peut alors supposer que les enfants qui seraient atteints d'une désorganisation précoce de la région d'Exner, impliquée dans les gestes de l'écriture, souffriraient de difficultés de lecture particulièrement prononcées en chinois.

Ainsi, même si la lecture emprunte des voies anatomiques identiques dans toutes les cultures, leur vulnérabilité à la pathologie pourrait différer : les troubles phonologiques seraient prépondérants dans les écritures alphabétiques, tandis que dominerait la dyslexie « grapho-motrice » dans les écritures asiatiques – même si les deux sous-types existent vraisemblablement dans tous les pays[284].

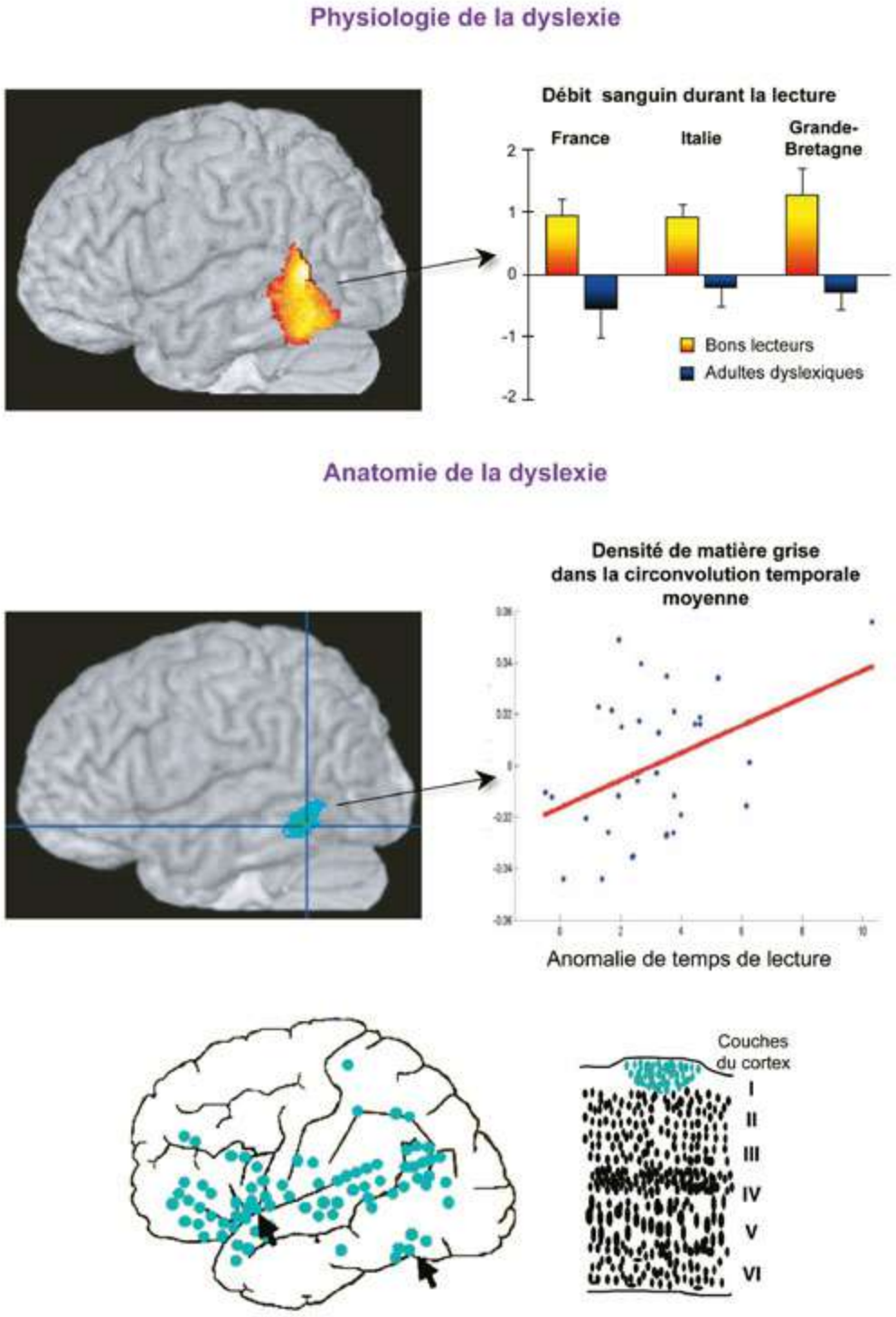


Figure 6.1 D'importantes désorganisations corticales sont fréquemment observées dans le cerveau des dyslexiques. L'activation cérébrale, estimée par le débit sanguin, est anormalement faible dans les régions moyenne et inférieure du lobe temporal gauche (en haut, d'après Paulesu et coll., 2001). Chez les mêmes personnes, une augmentation de la densité de matière grise, corrélée aux troubles de la lecture, est observée dans la région temporale moyenne (au milieu, d'après Silani *et al.*, 2005). Dans les rares cas où une autopsie a été pratiquée (en bas), Albert Galaburda et ses collègues (1985) ont observé de nombreuses « ectopies » – des groupes désorganisés de neurones qui ont migré au-delà de leur position normale dans les couches du cortex. Ces ectopies sont particulièrement denses dans les régions linguistiques et visuelles qui sont essentielles à la lecture.

Principal suspect : le lobe temporal gauche

Pratiquement toutes les études d'imagerie cérébrale de la dyslexie retrouvent une sous-activation de la région temporale postérieure gauche chez les dyslexiques[285]. Celle-ci s'observe non seulement chez l'adulte, mais également chez l'enfant de 8 à 12 ans, où son amplitude prédit la sévérité des troubles de lecture. Une autre anomalie est également fréquente : chez les dyslexiques, le cortex frontal inférieur gauche (région de Broca) est fréquemment *sur*-activé pendant la lecture ou d'autres tâches phonologiques[286]. Tout se passe comme si, en compensation de l'activité trop faible des régions postérieures de décodage, le cerveau s'engageait dans une tentative de lecture volontaire, contrôlée et consciente, quoique souvent infructueuse.

En examinant attentivement les images d'Eraldo Paulesu (figure 6.1), on distingue en fait au moins deux régions sous-activées dans le cerveau des dyslexiques : le cortex temporal latéral et une région temporale plus inférieure qui appartient à la voie visuelle ventrale. Il est tentant de spéculer – même si ce ne sont, pour l'heure, que des hypothèses – que la première sous-activation représente la cause de la dyslexie et la seconde sa conséquence. En effet, l'une des fonctions associées à la région temporale latérale est le traitement des informations phonologiques du langage parlé (voir par exemple la figure 2.19). Une anomalie très précoce dans la mise en place de ces réseaux neuronaux expliquerait les troubles phonologiques observés chez les dyslexiques et les enfants à risque dès la première année de vie. Elle entraînerait des difficultés disproportionnées de la conscience phonémique, et donc d'apprentissage du code alphabétique. Ces difficultés phonologiques, à leur tour, empêcheraient la région occipito-temporale ventrale, siège de la forme visuelle des mots, d'acquérir son expertise – d'où la seconde sous-activation observée à ce niveau.

Rien n'exclut, naturellement, que la région occipito-temporale soit également le siège d'atteintes directes, au moins chez certains enfants. Une étude d'imagerie fonctionnelle le suggère fortement. Eamon McCrory et ses collaborateurs ont présenté à des adultes normaux ou dyslexiques soit des mots, soit des dessins au trait, en leur demandant de les nommer à haute voix. La région occipito-temporale ventrale gauche était la seule à être fortement sous-activée chez les dyslexiques, aussi bien par les mots que par

les images. Il n'est pas impossible, bien sûr, que l'apprentissage de la lecture ait augmenté la réponse de cette région aux mots et aux dessins (par exemple parce que, chez les bons lecteurs, cette région aurait développé de nombreux détecteurs neuronaux de T, L, et autres jonctions fréquentes dans les dessins au trait). Mais il paraît plus probable – et telle était l'interprétation des auteurs – que cette région ait été très précocement désorganisée chez les dyslexiques. Comme cette région joue un rôle unique dans la mise en liaison des formes visuelles avec la phonologie du langage, sa désorganisation précoce pourrait avoir un impact dramatique sur la lecture, tout en n'ayant qu'un impact mineur sur la reconnaissance des images.

Le scénario d'un double déficit, visuel et phonologique, sort renforcé d'analyses de la séquence temporelle des activations cérébrales chez les dyslexiques. La technique de magnéto-encéphalographie, qui mesure le décours temporel des champs magnétiques évoqués lorsque le cortex s'active, a révélé deux anomalies successives dans le déroulement de la reconnaissance des mots.

• Au sein des étapes visuelles, après un traitement initial normal, les dyslexiques ne montrent pas la forte activation occipito-temporale gauche qui, vers 150 à 200 millisecondes, constitue la signature de la reconnaissance invariante de la chaîne de caractères[287]. Tout se passe comme si cette région n'avait pas acquis la capacité de reconnaître, en parallèle, l'ensemble des lettres d'un mot – ce qui expliquerait la persistance, chez les dyslexiques, d'une énorme influence du nombre de lettres sur le temps de lecture[288].

• Dans un second temps, après 200 millisecondes, alors que les lecteurs normaux activent rapidement les régions latérales du cortex temporal gauche, chez les dyslexiques, l'activité apparaît faible à gauche, mais beaucoup plus intense dans la région temporo-pariétale droite[289]. On peut penser que cela traduit l'absence d'accès rapide à la phonologie des mots, ainsi peut-être qu'une stratégie anormale de compensation par l'hémisphère droit.

En résumé, l'activité fonctionnelle du cerveau des dyslexiques n'est pas normale : plusieurs régions clés ne sont pas suffisamment activées, au niveau à la fois de l'analyse visuelle et de celui du traitement phonologique. Mais d'où proviennent ces anomalies ?

Migrations neuronales

L'observation d'activations cérébrales anormales ne fait naturellement que poser avec plus d'acuité la question des causes de la dyslexie. Pourquoi les régions temporales gauches ne s'activent-elles pas suffisamment ? Sont-elles lésées ? Mal connectées ? Le déficit réside-t-il dans l'organisation macroscopique des faisceaux de connexions ? Ou bien, à un niveau plus microscopique, dans les molécules qui tapissent les membranes des neurones et de leurs synapses ? L'embryon de réponse dont nous disposons suggère que toutes ces pistes de recherche pourraient avoir un fond de vérité[290].

Commençons par l'organisation anatomique du cortex et de ses connexions. Des techniques statistiques fines ont récemment révélé que l'IRM anatomique, que l'on croyait normale chez les dyslexiques, permet en fait de détecter des anomalies significatives. L'une de ces techniques consiste à quantifier, en tout point du cerveau, la densité de matière grise – l'écorce cérébrale qui contient les six couches de neurones de nos hémisphères cérébraux. On soumet ensuite cette mesure de densité, qui estime grossièrement l'épaisseur et le plissement du cortex, à une analyse statistique qui compare les patients avec un groupe de témoins. Appliquée aux dyslexiques italiens, français et anglais de l'étude d'Eraldo Paulesu, cette technique a révélé une profonde désorganisation de la région temporale gauche, précisément en regard des régions dont l'activité est réduite (figure 6.1). L'analyse statistique a identifié des régions où la matière grise était trop dense et d'autres endroits, tout à côté, où elle était raréfiée. Les augmentations de volume du cortex étaient particulièrement fortes et leur écart de la normale prédisait la vitesse de lecture des patients[291].

Mais pourquoi une *augmentation* de la quantité de matière grise serait-elle délétère ? L'IRM macroscopique ne montre pas les mécanismes neuronaux sous-jacents. Cependant, de rares cas d'adultes dyslexiques, décédés d'une autre cause et dont le cerveau a été autopsié, peuvent nous éclairer.

Dès 1979, le neurologue américain Albert Galaburda, de l'hôpital Beth Israel de Boston, examina le cerveau d'un dyslexique de 20 ans, puis au fil des années, de plusieurs autres patients[292]. Il y découvrit de nombreuses

« ectopies », un mot d'origine grecque qui signifie que les neurones ne sont pas à leur place. C'est un fait peu connu que, dans le cerveau du fœtus, au cours de la grossesse, les neurones corticaux se déplacent sur des distances considérables, dans un vaste mouvement migratoire qui les entraîne depuis la zone germinale autour des ventricules, où ils se forment par division cellulaire, jusqu'à leur position finale dans les différentes couches du cortex.

La division et la migration des neurones sont des étapes critiques pour la bonne formation du cerveau – c'est à cet instant que le cerveau du fœtus est le plus sensible aux agents pathogènes tels que l'alcool, par exemple. Or, chez les dyslexiques, la migration neuronale semble altérée. À l'autopsie, Albert Galaburda découvrit de petits amas de neurones à la surface du cortex, comme s'ils avaient dépassé leur position normale. En d'autres endroits, des couches corticales mal formées, « dysplasiques » ou formant des microplissements, suggéraient que les neurones n'étaient jamais parvenus jusqu'à leur cible. Enfin, certains sillons corticaux semblaient avoir perdu leur asymétrie en faveur de l'hémisphère gauche qu'ils présentent dans le cerveau normal et qui trahit la spécialisation de l'hémisphère gauche pour le traitement du langage.

Selon Galaburda, ces anomalies sont fréquentes dans la dyslexie. Leur combinaison pourrait expliquer le patchwork de sur- et de sous-épaisseurs corticales que l'on voit en IRM. Les ectopies, pour des raisons inconnues, se concentrent principalement dans l'hémisphère gauche, autour des aires impliquées dans le traitement du langage parlé, mais également dans la région occipito-temporale gauche qui joue un rôle si important dans la reconnaissance visuelle des mots (figure 6.1). Parsemées de neurones mal placés, ces régions ne fonctionneraient plus à leur niveau optimal, ce qui entraînerait de subtils déficits phonologiques et visuels qui, fréquemment, se transforment en dyslexie.

On s'attend évidemment à ce qu'une telle désorganisation des neurones corticaux ait aussi un impact négatif sur leurs connexions. C'est exactement ce qui a été observé par IRM. Toutes les études, issues pourtant de laboratoires et de méthodes différents, suggèrent une profonde altération de faisceaux bien particuliers de connexions, situés dans la profondeur des régions pariéto-temporales de l'hémisphère gauche (figure 6.2)[293]. Le degré de désorganisation des connexions corticales en ce point du cerveau prédit

les scores de lecture, non seulement chez les dyslexiques, mais également au sein de la population normale. Il reste malheureusement très difficile, avec la résolution spatiale de l'IRM, d'isoler avec précision les aires corticales que connectent ces faisceaux altérés. Toutefois, la position des anomalies, dans l'hémisphère gauche, juste en regard du cortex temporal sous-activé dans la dyslexie, renforce l'hypothèse d'une déconnexion partielle de la région temporale gauche du reste du cerveau et particulièrement des régions frontales[294].

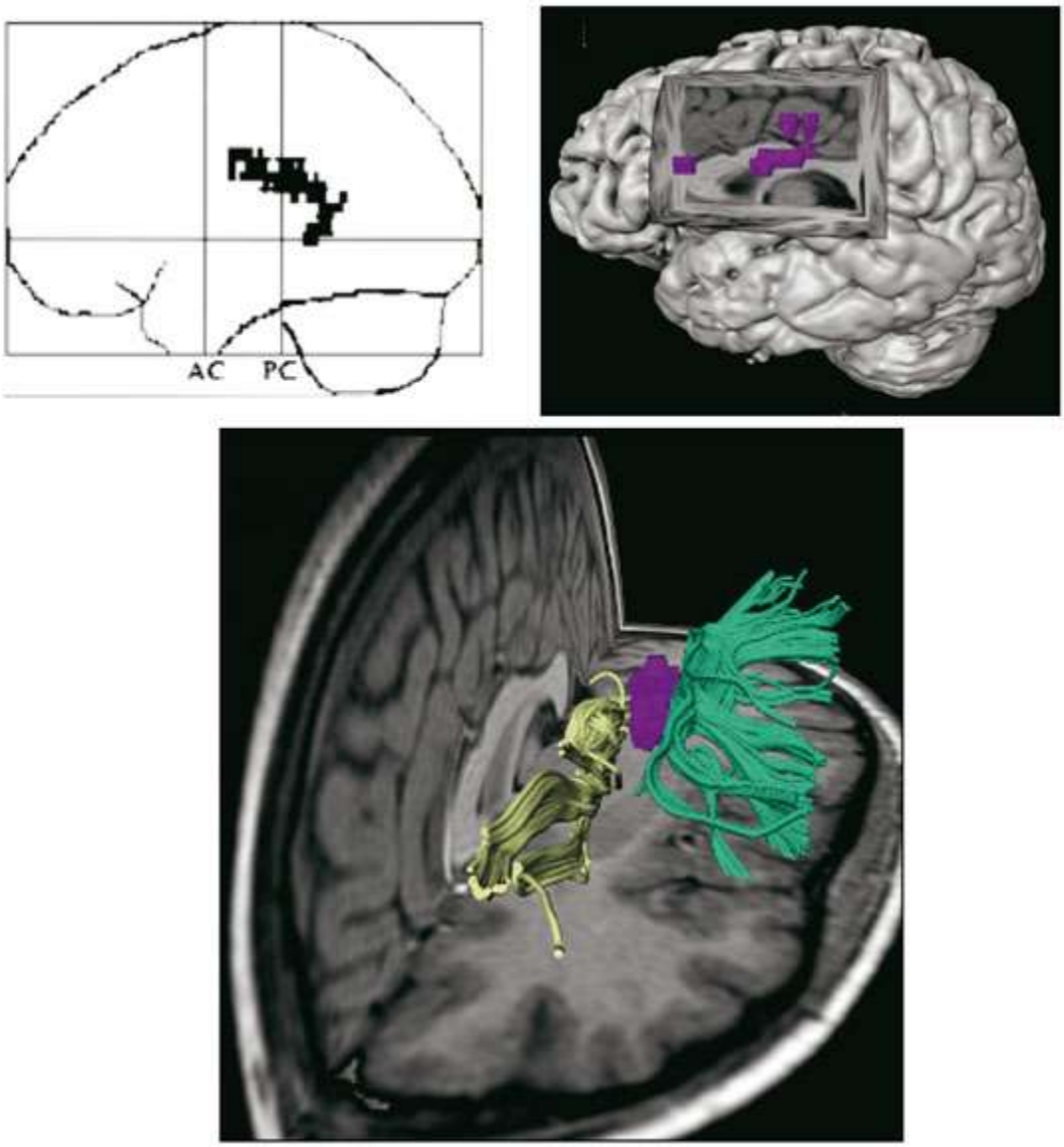


Figure 6.2 Les connexions corticales à longue distance sont altérées chez les dyslexiques. Plusieurs études indépendantes montrent une désorganisation des faisceaux situés dans la profondeur des régions pariéto-temporales de l'hémisphère gauche (à gauche, Klingberg et coll., 2000 ; à droite et en bas, Beaulieu et coll., 2005).

La souris dyslexique

Pour aller plus loin, il faudrait examiner la connectivité de ces régions au microscope et leur activité neuronale à l'aide de microélectrodes – une recherche virtuellement impossible chez l'homme. C'est pourquoi, pour progresser dans l'analyse des bases biologiques de la dyslexie, Albert Galaburda s'est tourné vers une autre source de données : l'étude du cerveau des rongeurs.

Au premier abord, l'idée de rechercher les origines de la dyslexie chez l'animal peut paraître absurde. Les railleurs n'ont d'ailleurs pas manqué de dénigrer la découverte de « troubles de la lecture chez la souris » ! Et pourtant, cette stratégie de recherche très innovante a conduit à certaines des avancées récentes les plus significatives sur la neurobiologie de la dyslexie.

L'idée était de reproduire les anomalies de migration neuronale chez l'animal afin de mieux en comprendre les mécanismes et leurs conséquences. Pour causer des ectopies comparables à celles observées chez l'homme, Galaburda et ses collègues inventèrent une méthode originale. Elle consistait à geler des microrégions du cortex du rat. Cette intrusion perturbait la membrane des cellules de support des neurones, les cellules « gliales », dont l'un des rôles est de guider la migration des neurones. Chez les rats ainsi refroidis se créaient alors de petits secteurs ectopiques où les neurones migraient au-delà de leur position normale.

Les chercheurs ont ensuite montré que cette perturbation entraînait toute une chaîne de conséquences inattendues. Localement, la désorganisation corticale induisait des décharges neuronales anormales qui pouvaient entraîner la formation d'un foyer épileptique ou, au minimum, des perturbations des rythmes de l'électro-encéphalogramme. Plus surprenants étaient les effets à grande distance des lésions de départ. Peu importe où l'on pratiquait les lésions corticales initiales, dans le cortex frontal, pariétal ou occipital : toutes affectaient en retour les noyaux sensoriels du thalamus, qui relaient les entrées visuelles et auditives. Chez les rats dont le cortex avait été refroidi, les cellules de grande taille du thalamus, qui caractérisent la voie dite « magno-cellulaire », mouraient à un rythme anormalement élevé. En bref, les microlésions du cortex favorisaient la mort cellulaire dans le thalamus.

Dans un aller-retour très productif entre leur modèle animal et le cerveau humain, Albert Galaburda et ses collègues retournèrent alors à leur « bibliothèque » de cerveaux humains dyslexiques, où ils répliquèrent les observations initialement faites chez le rat. Le secteur auditif du thalamus gauche des personnes dyslexiques contenait trop de petits neurones et trop peu de grands corps cellulaires[295]. Ces anomalies expliquaient-elles les déficits sensoriels des dyslexiques ? De retour chez l'animal, la même équipe conçut de nouveaux tests raffinés du comportement auditif qui révélèrent des analogies toujours plus profondes avec l'espèce humaine. Les rats refroidis devenaient insensibles à l'ordre temporel de deux sons brefs. Ils étaient également incapables de repérer une brève interruption dans une série de sons – des déficits semblables à ceux rapportés chez les dyslexiques.

Il y a plus étonnant encore : toutes ces anomalies apparaissaient principalement chez les rats mâles. Chez les femelles, la même quantité initiale de lésions corticales n'entraînait ni mort cellulaire dans le thalamus ni déficits sensoriels. Des manipulations hormonales montrèrent que c'était la testostérone, présente en plus grande concentration chez les mâles, qui amplifiait les effets des lésions sur le thalamus. À nouveau, c'est une analogie potentielle avec l'espèce humaine. Bien que ce point reste débattu, la dyslexie semble affecter plus fortement les hommes que les femmes. Si l'on en croit le modèle animal, on devrait s'attendre en réalité à ce que les troubles phonologiques, qui sont issus des lésions corticales, soient aussi fréquents chez les hommes que les femmes. Cependant, chez l'homme, plus que chez la femme, ils devraient être associés à d'autres troubles sensoriels auditifs et visuels qui viendraient compliquer encore l'apprentissage de la lecture.

Le modèle animal fournit ainsi une chaîne explicative complète, certes hypothétique, mais susceptible d'expliquer les principaux traits cognitifs et anatomiques de la dyslexie[296]. Selon ce scénario, autour du sixième mois de grossesse, des perturbations de la migration neuronale entraînent l'apparition d'ectopies et de microsillons. Ce saupoudrage de malformations corticales concentrées sur les aires du langage vient fragiliser les représentations phonologiques qui seront indispensables, six ans plus tard, à l'alphabétisation. En parallèle, il entraîne en cascade des

anomalies secondaires des régions sensorielles du thalamus, ce qui réduit encore la précision du codage des entrées auditives et visuelles.

La génétique de la dyslexie

Reste à comprendre d'où proviennent, chez l'homme, les anomalies corticales qu'Albert Galaburda provoque artificiellement chez le rat. C'est ici que la génétique joue un rôle majeur. Dès les années 1990, Galaburda et ses collègues font une nouvelle percée en créant, par sélection, une lignée de souris qui présente spontanément une grande probabilité de souffrir d'ectopies corticales – un premier pas sur la voie d'une élucidation des mécanismes génétiques qui contrôlent la migration des neurones.

En parallèle, de vastes bases de données génétiques sur la dyslexie sont créées en Finlande, aux États-Unis dans le Colorado et en Grande-Bretagne. En recoupant les informations génétiques avec les résultats de multiples tests psychologiques, elles permettent d'identifier au moins six grandes régions du génome humain, sur les chromosomes 1, 2, 3, 6, 15 et 18, dont les variantes sont fréquemment associées à la dyslexie. L'étude de grandes familles dont plusieurs membres sont atteints de dyslexie permet d'affiner la localisation des régions impliquées. De sorte qu'en 2003, une équipe finlandaise présente le premier candidat sérieux, le gène DYX1C1 sur le chromosome 15. Depuis, les découvertes ne cessent de s'accélérer : en 2004 et 2005 ont été identifiés trois autres gènes de susceptibilité à la dyslexie, répondant aux doux noms de KIAA0319, DCDC2 (tous deux sur le chromosome 6) et ROBO1 (sur le chromosome 3)[297].

Pourquoi tant de gènes ? Sans doute parce que tous contribuent, de près ou de loin, aux complexes opérations de mise en place des neurones corticaux dans les nombreuses régions essentielles à la lecture. La construction d'un réseau aussi complexe s'apparente à celle d'un gratte-ciel : il faut des dizaines d'architectes et d'entrepreneurs, et il suffit que l'un d'entre eux fasse une erreur pour que l'ensemble de l'ouvrage soit compromis. Bien sûr, chaque architecte travaille à d'autres projets, et de même aucun gène n'est entièrement dédié à la lecture ou même à la phonologie – d'ailleurs, des variantes de tous les gènes cités plus haut existent chez la souris ! Cependant, certains intervenants jouent un rôle vraiment essentiel, dans l'ossature même du bâtiment ou dans sa clé de

voûte. Si l'édifice est fragile – et c'est le cas de la lecture d'une écriture alphabétique –, toute erreur de leur part peut conduire à son effondrement.

Dans le cas de la lecture, la clé de voûte semble être la migration harmonieuse des neurones corticaux vers la région temporale gauche et leur mise en connexion avec les régions visuelles et linguistiques. C'est un chantier très compliqué : pour guider les neurones qui voyagent de la région ventriculaire jusqu'à leur destination finale, se mettent d'abord en place des échafaudages formés de longs filaments radiaux de cellules gliales. Puis, chaque cellule gliale mère se divise, et ses cellules filles deviennent les neurones qui viendront littéralement ramper le long de leur mère jusqu'au cortex.

Tous les gènes impliqués dans la dyslexie contribuent-ils à cet immense chantier ? Pour le savoir, Joe Lo Turco et ses nombreux collaborateurs ont utilisé, chez le rat, une technique d'interférence ARN qui permet d'interrompre, transitoirement, la traduction d'un gène choisi, en maîtrisant très précisément où et quand cette interférence se produit[298]. En utilisant cette technique *in utero*, dans la zone ventriculaire, au moment précis de la migration neuronale, ils ont montré que les gènes DYX1C1, DCDC2 et KIAA0319 jouent tous un rôle essentiel dans la migration neuronale. Lorsque leur traduction est bloquée, les neurones ne migrent plus assez loin, ce qui engendre les ectopies et autres microsillons caractéristiques du cerveau humain dyslexique. D'autres gènes sont impliqués : le gène LIS1 par exemple, travaille en association très étroite avec DYX1C1 et joue un rôle tellement important que sa perturbation entraîne une dramatique lissencéphalie : les hémisphères cérébraux sont lisses et le cortex complètement désorganisé.

Qu'en est-il du quatrième gène associé à la dyslexie, ROBO1 ? À l'heure où j'écris ces lignes, son rôle n'est pas bien connu, mais il en existe un homologue chez la souris, le poulet et même la mouche drosophile, où il contrôle la formation des dendrites et des axones qui relient les moitiés droite et gauche du système nerveux. Le même gène interviendrait-il, chez l'homme, dans la formation des connexions du corps calleux, qui relient également les deux hémisphères, et dont on verra plus loin qu'elles pourraient jouer un rôle essentiel dans les aspects visuels de la dyslexie ? La recherche génétique est en marche, et il n'est pas douteux qu'une chaîne

causale complète, depuis le gène jusqu'au comportement, se mettra en place dans les prochaines décennies.

Surmonter la dyslexie

La découverte des mécanismes neuronaux et génétiques de la dyslexie entraînera-t-elle des avancées dans sa prise en charge ? À court terme, cela me paraît peu probable, car les anomalies de migrations neuronales surviennent pendant la grossesse, à un moment où il est douteux qu'une thérapie puisse être tentée, que ce soit par une voie médicamenteuse classique ou par thérapie génique.

Faut-il, dès lors, en conclure que la dyslexie restera toujours incurable ? Lorsque je donne des conférences sur la lecture et ses troubles, je repère facilement, dans la salle, les parents d'enfants dyslexiques. Beaucoup vivent chaque avancée de la science comme un coup de poignard : c'est leur enfant à qui il manque de la matière grise, dont le cortex temporal ne s'active pas, dont les neurones ont mal migré, dont les gènes sont différents… et chacune de ces découvertes biologiques sonne comme une condamnation sans appel.

Les enseignants, eux, réagissent avec un mélange de soulagement et de découragement. Lorsqu'on leur explique que la dyslexie est associée à des anomalies du cerveau, beaucoup en concluent qu'elle ne relève plus de leur compétence. « Comment voudriez-vous que, moi, simple instituteur, qui ai déjà bien du mal à apprendre à lire aux enfants normaux, je puisse guérir une maladie du cerveau ? Intervenir dans le cortex, ce n'est pas mon métier. »

Quoique compréhensibles, ces réactions de découragement sont totalement infondées. Aux origines de cet excès de pessimisme, je crois identifier au moins deux idées fausses qui relèvent, encore trop souvent, du prêt-à-penser sur le cerveau et son développement. La première de ces erreurs consiste à associer biologie et immobilisme, comme si ce qui était dicté par les gènes restait gravé pour la vie dans le marbre de nos organismes, sans que nous ne puissions plus rien y changer. Une métaphore suffira à la réfuter : pensons à une autre maladie grave, souvent d'origine génétique, qui affecte des millions de Français… la myopie, qu'un coup de

laser ou le port de lunettes suffit pourtant à effacer. Qui dit que nous ne pourrons jamais trouver l'équivalent cognitif des lunettes pour la dyslexie ?

Quant à la seconde erreur, plus subtile, elle traduit ce que j'appellerai le « crypto-dualisme » de notre société. C'est l'idée que toutes les aides qu'on apporte à l'enfant, les cours, les séances d'orthophonie, la rééducation, l'écoute et le dialogue n'interviennent qu'à un niveau « psychologique » bien distinct du niveau cérébral. Comment toutes ces interventions pourraient-elles changer quoi que ce soit à une pathologie des circuits neuronaux ? Et pourtant… puisqu'il existe une relation d'identité entre chacune de nos pensées et les assemblées de neurones de notre cerveau, on ne peut pas toucher à l'une sans affecter l'autre.

Je ne dis évidemment pas qu'en y pensant très fort, nous allons permettre à nos neurones de se démultiplier ou de migrer ailleurs ! Mais j'affirme que l'opposition des sciences de la psychologie avec celles du cerveau est dépourvue de tout fondement. Dans notre cortex, l'imbrication des niveaux d'organisation est telle que toute intervention psychologique se répercute dans nos circuits neuronaux jusqu'aux niveaux cellulaire, synaptique, moléculaire et va jusqu'à modifier l'expression des gènes. Ainsi, ce n'est pas parce qu'une pathologie se situe à une échelle neurobiologique microscopique qu'elle ne peut pas être compensée par une intervention psychologique… et *vice versa*. L'effet du lithium sur certaines maladies psychiatriques ou les bouleversements qu'induisent les drogues sur nos états cognitifs et affectifs sont là pour nous rappeler à quel point ces ponts entre l'échelle moléculaire et l'organisation de la pensée peuvent être puissants et directs.

Il faut donc dire et redire aux parents d'enfants dyslexiques que la génétique n'est pas une condamnation à perpétuité ; que le cerveau est un organe plastique, perpétuellement en chantier, où l'expérience dicte sa loi tout autant que le gène ; que les anomalies de migrations neuronales, quand elles existent, n'affectent que de toutes petites régions du cortex ; que le cerveau de l'enfant comprend des millions de circuits redondants qui peuvent se compenser l'un l'autre ; et que, enfin, notre capacité d'intervention n'est pas nulle : chaque nouvel apprentissage modifie l'expression de nos gènes et transforme nos circuits neuronaux. Grâce aux avancées de la psychologie de la lecture, nous pourrons imaginer de meilleures méthodes d'enseignement et de rééducation de la lecture. Grâce

aux prouesses de la neuro-imagerie, nous pourrons vérifier dans quelle mesure ces avancées restaurent effectivement des circuits neuronaux fonctionnels.

Depuis une vingtaine d'années déjà, plusieurs spécialistes de la lecture ont conçu des stratégies efficaces de rééducation[299]. La plupart visent à accroître la conscience phonémique à l'aide de manipulations des lettres et des sons. On présente par exemple à l'enfant des paires de mots proches dont il connaît le sens (par exemple « car » et « bar »). On lui montre alors que le déplacement d'une lettre suffit à passer d'un mot à l'autre. On peut ensuite lui expliquer que la même lettre « c », qui transforme « bar » en « car », peut aussi servir à écrire d'autres mots tels que « canard », « col » ou « cri ». Par ces petits jeux, l'enfant prend progressivement conscience du phonème *c* et de sa correspondance avec la lettre « c ». Si l'enfant n'entend pas bien les phonèmes les plus proches, l'orthophoniste ou l'ordinateur peuvent lui en présenter des versions exagérément articulées, plus faciles à discriminer.

Plusieurs ingrédients essentiels contribuent au succès de ces entraînements. Il y a, tout d'abord, la durée de l'effort et sa répartition en séances quotidiennes intensives et renouvelées sur plusieurs semaines. En effet, de nombreuses études ont démontré que la plasticité cérébrale, chez l'homme comme chez l'animal, est maximisée par la répétition intense d'une même tâche, entrecoupée de périodes de sommeil. Toutefois, il est au moins aussi important que la rééducation suscite chez l'enfant attention et plaisir. La vigilance et la récompense modulent en effet l'apprentissage. Elles sont associées à certains systèmes de neuromédiateurs ascendants, particulièrement l'acétylcholine, dont le rôle pourrait être d'indiquer au reste du cerveau l'importance et la pertinence qu'il peut y avoir à mémoriser la situation présente (chacun connaît ces souvenirs instantanés qu'inscrivent en nous des expériences émotionnelles fortes, comme le 11 septembre 2001). L'expérimentation animale le prouve : lorsque l'on associe systématiquement une activité perceptive avec l'activation des neurones cholinergiques, on accroît considérablement la place allouée à cette tâche dans le cortex[300]. Par analogie, chez l'enfant, maximiser l'attention et les émotions positives peut amplifier l'apprentissage.

L'une des stratégies consiste à présenter la rééducation sous forme d'un jeu sur un ordinateur[301]. L'informatique fascine les enfants. Elle présente

l'intérêt de générer des milliers d'exercices, sans lassitude et à moindre coût. Enfin, et surtout, le logiciel peut s'adapter à chaque enfant. Les plus performants détectent le niveau de l'enfant et proposent automatiquement des problèmes adaptés. Leur objectif est de cibler ce que le psychologue russe Lev Vygotsky a appelé la « zone proximale » d'apprentissage – une région du domaine que l'on cherche à enseigner où l'apprentissage est maximal car les problèmes sont suffisamment difficiles pour susciter l'intérêt de l'enfant, mais suffisamment faciles pour éviter tout découragement. Bien entendu, cette région évolue au fil de l'apprentissage et l'ordinateur suit continûment les progrès de l'enfant.

Sans être miraculeux, l'impact des rééducations cognitives de la dyslexie est substantiel. Après quelques dizaines d'heures d'apprentissage, des enfants dont les scores de lecture se situaient bien en deçà de la moyenne reviennent dans la partie basse de la normale (leurs scores remontent d'un ou deux écarts types). La grande majorité des enfants dyslexiques peut ainsi apprendre à lire, même si c'est avec un décalage par rapport aux autres enfants du même âge. De plus, les bénéfices obtenus se maintiennent sur plusieurs années. En général, le décodage des mots devient très efficace. Seule la fluidité de la lecture continue de gêner ces enfants : après rééducation, ils savent lire, mais avec lenteur. Cet écart résiduel pourrait être simplement dû à leur moindre expérience : par rapport aux autres enfants, il leur manque plusieurs années d'expérience de la lecture. Passées les premières années, on apprend à lire… en lisant ! Il faut donc que ces enfants continuent à lire encore et encore, afin d'enrichir leur vocabulaire visuel de graphèmes, de morphèmes et de mots.

L'imagerie cérébrale montre que la rééducation intensive produit deux effets majeurs sur le cerveau : normalisation et compensation[302]. Au sein des réseaux typiques de la lecture, l'activité se normalise. On se souvient que le cerveau dyslexique se caractérise principalement par une diminution d'activité dans la région temporale gauche. Après l'entraînement, pratiquement toutes les études, que ce soit avec l'IRM ou la magnéto-encéphalographie, observent un net regain d'activité dans cette région. Cette augmentation explique probablement l'amélioration des performances phonologiques. D'autres réactivations se voient également dans la région visuelle ventrale, responsable de l'identification des chaînes de lettres, et dans la région frontale inférieure, associée à l'articulation (figure 6.3). À

chaque fois, il semble qu'une région proche, mais pas exactement identique à celle activée chez l'enfant normal, prenne le relais. On observe également des compensations plus radicales. L'activité cérébrale augmente notamment dans les régions symétriques de l'hémisphère droit. Sans doute ces régions comportent-elles des circuits intacts suffisamment proches de la fonction requise pour être recyclés pour la lecture.

En définitive, c'est un grand message d'espoir qui émerge de ces travaux. En quelques décennies, l'analyse de la dyslexie a permis d'en comprendre le cœur – une perturbation phonologique –, les mécanismes neuronaux et les manières d'y apporter remède. Reste toutefois de nombreuses interrogations qui constituent autant de chantiers pour les années à venir. Toutes les dyslexies ont-elles la même origine ? Peut-on caractériser plus finement la pathologie de chaque enfant, afin d'affiner son traitement ? Enfin, sommes-nous passés à côté de certaines catégories d'enfants qui bénéficieraient d'une tout autre approche ?

Même si la recherche des trente dernières années a été dominée par l'hypothèse phonologique, quelques dissensions se font jour. Il est frappant, par exemple, de constater que l'un des tests les plus sensibles de dyslexie est la dénomination rapide de chiffres et d'images, tâche qui n'a rien de spécifiquement phonologique. À travers de vastes groupes d'enfants, dénomination rapide et tâches phonologiques contribuent à expliquer des portions distinctes de la variance des scores de lecture – ce qui signifie que, s'il existe une majorité d'enfants chez qui prédomine un trouble phonologique, chez d'autres la difficulté proviendrait avant tout de l'automatisation du lien entre vision et langage. Aurait-on négligé une catégorie importante de dyslexies d'origine visuelle ?

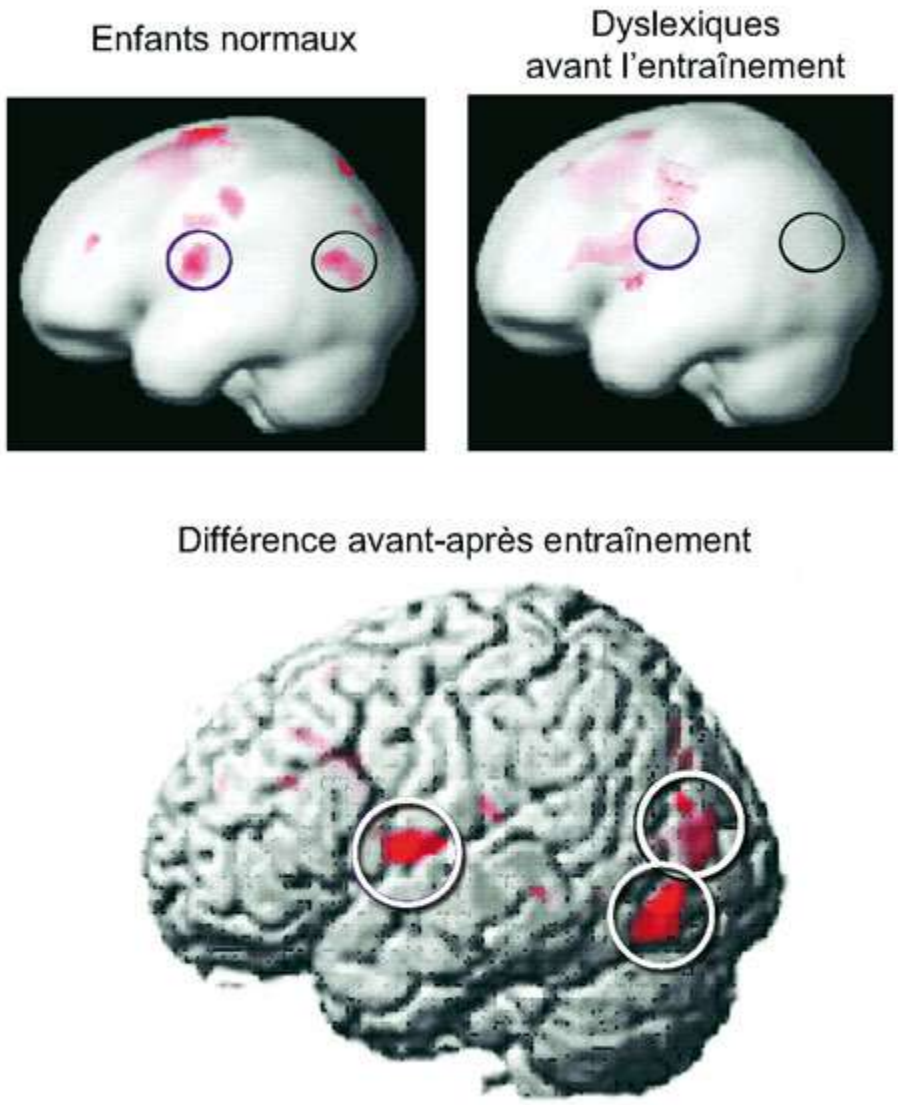


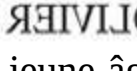
Figure 6.3 Une rééducation intensive par ordinateur permet de restaurer une activité cérébrale proche de la normale chez des enfants dyslexiques. Les images montrent les régions cérébrales activées lorsque les enfants jugent si deux lettres riment. Après entraînement, l'activité remonte dans des régions temporales et pariétales proches, mais pas identiques à celles observées chez l'enfant normal. D'autres régions de l'hémisphère droit, non visibles sur l'image, montrent également un regain d'activité (d'après Temple et coll., 2003).

Chapitre 7
Lecture et symétrie

Dans le langage courant, on désigne comme « dyslexique » toute personne qui confond les lettres en miroir et qui mélange la gauche et la droite. Se pourrait-il que la perception de la symétrie joue un rôle important dans la lecture ? En réalité, les inversions gauche-droite ne sont pas propres à la dyslexie. Pratiquement tous les enfants, au début de l'apprentissage, font des erreurs de lecture et d'écriture en miroir. Les études chez l'animal montrent que la capacité de reconnaître la symétrie fait partie des compétences essentielles du système visuel : elle facilite la reconnaissance des objets indépendamment de leur orientation. Lorsqu'un enfant apprend à lire, il doit donc « désapprendre » la généralisation en miroir avant de comprendre que « b » et « d » sont des lettres différentes. Chez certains enfants, ce désapprentissage, qui va à l'encontre des capacités spontanées du système visuel, semble présenter une source particulière de difficultés.

« D’abord il y a la pièce que tu peux voir dans le Miroir… Elle est exactement pareille à notre salon, mais les choses sont en sens inverse… Tiens, tu vois, les livres ressemblent pas mal à nos livres, mais les mots sont à l’envers ; je le sais bien parce que j’ai tenu une fois un de nos livres devant le miroir, et, quand on fait ça, ils tiennent aussi un livre dans l’autre pièce. »

Lewis CARROLL,
De l’autre côté du miroir (traduction Jacques Papy)

Vers l’âge de 5 ans, mon fils Olivier a adopté, pendant quelques mois, un comportement digne d’un personnage de Lewis Carroll. Son institutrice venait de lui apprendre à écrire son prénom. Il signait donc ses dessins avec beaucoup de fierté. Or, environ une fois sur deux, il commettait, sans s’en apercevoir, une énorme bourde : il écrivait son prénom de la droite vers la gauche, sans se tromper dans l’ordre des lettres, mais en les inversant. Le résultat était l’image en miroir de ce qu’il aurait dû écrire :  . Malgré ma fierté d’avoir produit un bambin capable, dès le plus jeune âge, d’imiter Léonard de Vinci, je vous avoue qu’une pointe d’anxiété m’a envahi. Fallait-il voir, dans ce comportement bizarre, le premier indice d’une dyslexie naissante ?

La consultation de la littérature scientifique m’a rassuré, mais elle a également accru mon étonnement. Il s’avère que tous les enfants du monde font les mêmes erreurs. Tous éprouvent des difficultés à discriminer des lettres ou des mots de leur image en miroir. De plus, il n’est pas rare qu’ils écrivent spontanément à l’envers (figure 7.1)[303]. Il s’agit là d’un comportement strictement normal, qui se manifeste dans toutes les cultures, y compris en Chine et au Japon. Il s’observe à l’âge où l’enfant produit ses premiers écrits. Seul le prolongement de ce phénomène au-delà de 8 ou 10 ans donne des raisons de s’inquiéter. À cet âge-là, en effet, les erreurs

d’inversion en miroir sont nettement plus fréquentes chez les enfants dyslexiques, même si elles tendent également à disparaître ensuite[304].

Chez mon fils, effectivement, l’écriture en miroir n’a duré qu’un temps très bref, et il a ensuite appris à lire et à écrire tout à fait normalement. Toutefois, l’existence d’un tel « stade du miroir » dans l’apprentissage de l’écriture soulève des questions fascinantes. D’où provient cette mystérieuse compétence ? Essayez d’écrire votre prénom en miroir – vous n’y parviendrez pas sans grandes difficultés. Pourquoi donc un petit enfant qui sait à peine tenir son crayon exhibe-t-il, sans le moindre entraînement, une habileté supérieure à celle d’un adulte ? Et pourquoi ne détecte-t-il pas son erreur ? À cet âge, l’enfant est déjà capable de repérer des anomalies dans un dessin ou des lettres manquantes dans le tracé de son prénom. Pourquoi donc accepte-t-il, sans sourciller, que son prénom s’écrive à l’envers ?

Ce curieux cocktail de talent (savoir écrire à l’envers) et d’aveuglement (ne pas se rendre compte de son erreur) fait toute la saveur de l’énigme que nous allons tenter de résoudre. Je prétends en effet que l’écriture en miroir apporte, par sa singularité même, un indice solide en faveur de l’hypothèse du recyclage neuronal. Comme l’ont noté Charles Darwin ou Steven Jay Gould, c’est dans les imperfections et les anomalies de la nature que résident les preuves les plus sûres de l’évolution. La perfection d’un œil et le profil d’une aile pourraient peut-être s’expliquer par le génie de la volonté divine – mais quelle divinité malicieuse songerait à placer l’un des yeux des poissons plats du mauvais côté du corps, celui que l’animal couche sur le fond, pour le faire ensuite migrer vers l’autre face au cours du développement ? Quel divin architecte aurait l’esprit assez tortueux pour faire descendre le nerf auditif de la girafe depuis l’oreille jusqu’à la base du cou avant de le renvoyer jusqu’au cerveau, lui faisant ainsi parcourir plusieurs mètres inutiles ? Si la nature n’était faite que d’organismes parfaits, je comprendrais peut-être que l’on accorde quelque crédibilité à l’hypothèse d’un « dessein intelligent ». Mais l’étude des êtres vivants révèle tant de bévues, qui sauteraient aux yeux du premier ingénieur venu, que la thèse de Darwin en sort considérablement renforcée : seuls les hasards de l’histoire évolutive peuvent les expliquer.

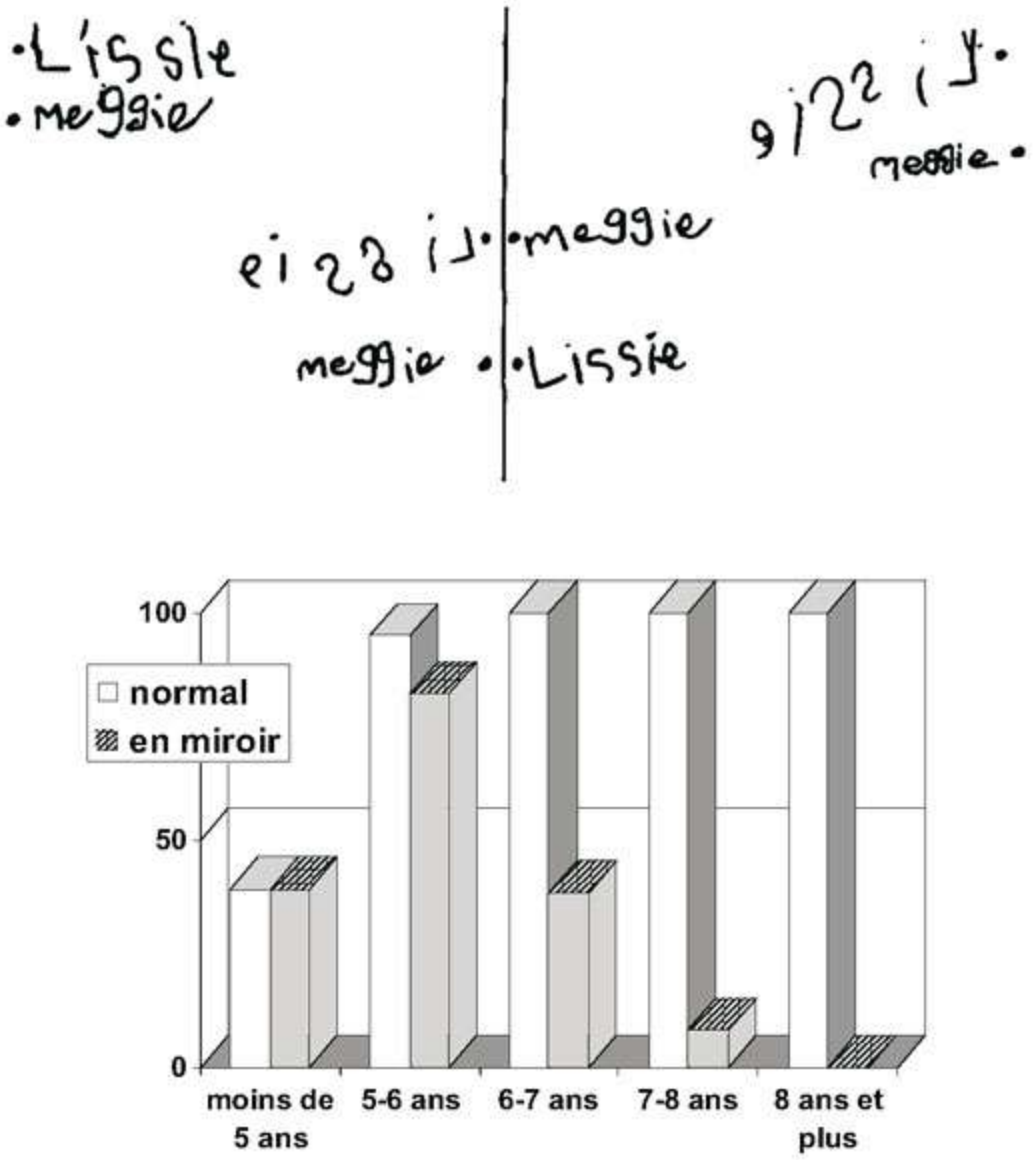


Figure 7.1 La plupart des enfants passent par un « stade du miroir » dans l'apprentissage de l'écriture, au cours duquel ils confondent les lettres et les mots avec leur image en miroir. Sur une feuille marquée d'une barre centrale, James Cornell a demandé à deux sœurs d'écrire leur prénom en commençant aux endroits marqués d'un point. Lissie (5 ans), s'est exécutée en écrivant spontanément en miroir lorsque la place manquait pour écrire de gauche à droite. Meggie (6 ans), par contre, a toujours écrit son prénom dans le sens habituel (d'après Walsh et Butler, 1996). Le graphe du bas indique le pourcentage d'enfants de chaque tranche d'âge capables d'écrire leur prénom en écriture normale et en miroir. On constate que presque tous les enfants, vers 5-6 ans, passent par une étape transitoire où le sens de l'écriture leur est indifférent (données de Cornell, 1985).

Il en va de même en psychologie. Qu'un comportement humain soit bien adapté peut s'expliquer d'au moins deux manières. Il se peut qu'il émane de notre patrimoine génétique, de notre évolution ; mais il se peut également qu'il soit mis en place par apprentissage. Lorsqu'un comportement est parfaitement ajusté, comme l'est la lecture chez l'adulte

expert, il est bien difficile d'en discerner les parts d'inné et d'acquis. C'est pourquoi les déviations de la perfection sont souvent plus intéressantes. Lorsqu'un enfant commet une erreur systématique ou bien, au contraire, lorsqu'il présente une compétence excessive, qui dépasse le champ de ce qu'on lui a enseigné, on peut supposer qu'il fait appel à des mécanismes anciens hérités de notre histoire évolutive.

Je prétends que l'écriture en miroir constitue une telle anomalie révélatrice. Si l'enfant lit et écrit spontanément en miroir, c'est que son système visuel, avant même de commencer à lire, obéit à une forte contrainte structurelle, extrêmement ancienne dans l'évolution, qui le force à *symétriser* les objets qu'il voit. Cette contrainte de symétrie était utile au cours de notre évolution. Elle demeure profondément enfouie dans la structure même de notre système visuel et influence fortement le développement normal et pathologique de la lecture.

Au cours des chapitres précédents, nous avons vu que l'architecture de notre système visuel est, en règle générale, favorable à la lecture. Elle nous permet d'apprendre à reconnaître les formes nouvelles des lettres et des mots indépendamment de leur taille et de leur forme exactes. La symétrie, en revanche, est une propriété qui gêne la lecture. Elle en rend l'apprentissage difficile, et nous fait commettre des confusions systématiques entre les lettres « p » et « q », ou « b » et « d ». Par ce biais, elle souligne une fois encore que le cerveau n'est pas vraiment préparé à la lecture et qu'il s'y reconvertit tant bien que mal.

Quand les animaux confondent droite et gauche

L'étude systématique de la confusion entre la gauche et la droite date de Pavlov. Dans les années 1920, le laboratoire de Pavlov s'intéresse aux limites du conditionnement animal : un chien peut-il apprendre à saliver lorsqu'on lui donne un indice A, mais pas lorsqu'on lui présente un autre indice B ?

En général, la réponse est affirmative. Cependant, l'équipe de Pavlov obtint des résultats curieux lorsqu'elle tenta d'inculquer à des chiens la différence entre la droite et la gauche. Les chiens, une fois conditionnés à saliver lorsqu'on leur touchait le côté droit du corps, ne pouvaient s'empêcher de le faire également lorsqu'on leur touchait le côté gauche. Ils

semblaient incapables d'apprendre une discrimination en miroir. Seule la section chirurgicale du corps calleux, ces connexions qui relient les deux hémisphères cérébraux, rétablissait la faculté de discriminer ces stimuli symétriques. Ainsi, l'échec initial des animaux n'était pas dû à un problème de mauvaise perception. Il s'agissait, selon Pavlov, d'une généralisation active de l'apprentissage, qui se propageait d'un hémisphère à l'autre par l'intermédiaire des connexions du corps calleux.

Depuis cette première expérience, de nombreuses espèces animales ont démontré l'ubiquité des confusions en miroir[305]. Entraînons, par exemple, un pigeon à frapper du bec sur une touche portant une ligne diagonale, puis examinons comment il généralise cet apprentissage à d'autres lignes d'orientation aléatoire. On observe deux pics de réponses : l'animal répond aux orientations proches de celle qu'il a apprise, mais également à leur symétrique. Bien qu'il n'ait jamais vu l'orientation symétrique au cours de l'apprentissage, il se comporte comme si cette image était identique à celle qu'il a apprise. De nouveau, cette compétence est abolie si l'on interrompt les connexions interhémisphériques[306].

La confusion gauche-droite dans l'espèce humaine

La psychologie humaine montre que, dans ce domaine, nous ne différons pas des pigeons ou des chiens. Lorsque nous avons appris à reconnaître une image, nous savons immédiatement reconnaître la forme symétrique en miroir. Ainsi Michael Tarr et Steven Pinker ont-ils appris à des étudiants à nommer des formes nouvelles, qui ressemblaient à des arbres pourvus de multiples branches[307]. Après cette période d'apprentissage, on leur présentait des formes nouvelles, plus ou moins proches des images apprises, et qui pouvaient notamment en différer par une symétrie. Le temps mis pour nommer les images en miroir était identique à celui mis pour nommer les images d'origine, pourtant vues cent fois plus souvent. Ainsi, l'opération de symétrie gauche-droite semble n'avoir aucun coût pour notre système nerveux – ce que nous apprenons dans un sens, nous le généralisons aussitôt en miroir.

Aiguisons notre introspection par un test de mémoire. Savez-vous vers quel côté se tournait la Semeuse sur les pièces d'un franc ? Sur une pièce américaine d'un *quarter*, George Washington montre-t-il son profil droit ou

gauche ? Dans quelle direction la Joconde tourne-t-elle les épaules, et quelle main pose-t-elle sur l'autre ? Le Penseur de Rodin tient-il son coude droit sur son genou gauche, ou l'inverse ? Essayez de vous décider avant d'aller voir les réponses en figure 7.2 – vos certitudes risquent d'être mises à mal.

Figure 7.2 Notre mémoire visuelle n’est guère sensible à l’orientation. Toutes ces images vous paraissent-elles familières ? C’est pourtant la première fois que votre système visuel les perçoit. En effet, elles sont toutes inversées en miroir.

Irving Biedermann et ses collègues de l’Université de Californie ont confirmé par des expériences rigoureuses les confusions en miroir de la

mémoire humaine. Leurs expériences exploitaient un effet d'apprentissage rapide : nous nommons plus vite des images que nous avons déjà vues auparavant, que celles que nous voyons pour la première fois. Cette facilitation perceptive suggère l'existence d'une trace mnésique qui peut persister pendant des heures, voire plusieurs jours. Cependant, cette mémoire à long terme ne conserve pas une photographie mentale de l'image exacte qui a été vue la première fois. En effet, après avoir nommé une image, la facilitation est la même lorsque la seconde image est exactement identique, décalée spatialement ou présentée en miroir[308]. Ainsi le souvenir que nous conservons d'une scène est-il suffisamment abstrait pour résister à une translation ou une symétrie. Dans la périphérie du champ visuel, l'invariance par translation pourrait même être plus coûteuse que la symétrie[309].

En bref, quand une image nous devient familière, notre mémoire visuelle semble l'enregistrer sans préciser son orientation dans l'espace, de sorte que, lorsque nous la revoyons, nous sommes incapables d'affirmer s'il s'agit de la même ou de son image miroir. Peut-être pensez-vous qu'il s'agit d'un phénomène trivial. Après tout, il y a de nombreuses images que nous ne sommes pas capables de distinguer, alors pourquoi devrions-nous être surpris de ne pas savoir différencier deux images en miroir ? En réalité, la généralisation en miroir n'a rien à voir avec une limitation perceptive. Sur notre rétine, deux images en miroir – par exemple les profils gauche et droit de la Joconde – se projettent sous des formes totalement différentes. Notre système visuel est capable de discriminations bien plus fines, telles que la distinction de deux visages différents vus sous le même angle. Si nous confondons les images en miroir, ce n'est donc pas faute de les percevoir. La faute en incombe plutôt au fait que notre système visuel « catégorise », c'est-à-dire qu'il décide de regrouper des images très différentes en un seul et même objet. Cette catégorisation est une opération complexe, qui résulte de mécanismes élaborés – ce n'est pas une simple erreur de perception.

Évolution et symétrie

Pourquoi notre système nerveux est-il si peu sensible à l'inversion de la gauche et de la droite ? Sans doute parce que nous avons évolué dans un environnement où cette distinction n'était guère utile[310]. Bien que notre

monde soit tridimensionnel, seuls deux axes de coordonnées semblent exercer une réelle influence sur l'évolution des espèces. Le premier axe, qui s'applique à tous, est la verticale, définie par la force de gravité. Le second, qui ne s'applique qu'aux espèces qui se déplacent, est l'axe antéropostérieur. Celui-ci définit une extrémité privilégiée du corps où se situent les organes des sens et de la nutrition. Ensemble, ces deux axes déterminent le plan d'organisation du corps, mais aussi la manière dont nous percevons l'espace. Discriminer la verticale de l'horizontale, ce qui est loin de ce qui est près, ou encore la face d'un animal de son arrière-train sont des opérations essentielles à la survie. Une forte pression s'est donc exercée, au fil de millions d'années, pour que ces contraintes géométriques soient internalisées dans le cerveau. C'est ainsi que notre système nerveux, comme celui de tous les primates, dispose de mécanismes évolués qui détectent les distances, distinguent les dangers venus du ciel (un aigle) de ceux proches du sol (un serpent), et discriminent les visages et leurs émotions.

La troisième direction de l'espace, celle qui différencie la gauche de la droite, ne reçoit pas autant d'égards. En effet, une inversion suivant cet axe n'a guère de conséquences pour notre survie, car elle laisse le monde pratiquement inchangé. Ainsi nous est-il impossible de détecter, lorsque nous examinons une photographie de scène naturelle, si la gauche et la droite ont été inversées : nous avons simplement l'impression d'examiner la scène sous un point de vue différent. L'axe gauche-droite possède ainsi un statut à part, moins essentiel à la survie que les autres axes de coordonnées. Après tout, un tigre est tout aussi menaçant quand il présente son profil droit ou son profil gauche… alors qu'un tigre sur le dos présente une menace bien moindre qu'un tigre dont les pattes touchent le sol[311] !

Non seulement il n'y a pas de pression évolutive forte à distinguer la gauche de la droite, mais la pression s'exerce vraisemblablement en sens opposé. Il nous est utile de confondre les images en miroir afin de généraliser automatiquement nos connaissances à la scène inverse. Supposons qu'un de nos ancêtres ait survécu à une rencontre avec un tigre venant de la droite. Ne serait-il pas avantageux, pour sa survie future, de le reconnaître au premier coup d'œil lorsqu'il surgit de la gauche ? Il est donc très probable qu'au fil des générations, l'évolution ait favorisé les individus dont le système visuel était capable de généraliser en miroir.

En généralisant en miroir, notre système nerveux prend le risque de confondre les objets qui, comme les chaussures, sont identiques à une symétrie près. Mais le risque est faible. Dans le monde naturel, la plupart des animaux et des plantes possèdent un plan de symétrie ou de quasi-symétrie, au moins superficiellement. Les organes internes ne sont pas toujours symétriques, mais l'aspect extérieur du corps l'est souvent (le homard, avec sa pince plus grosse d'un côté, est l'une des rares exceptions). L'évolution semble faire le pari que l'on gagne à négliger ces petites asymétries si cela nous permet de réagir plus vite dans les situations importantes qui sont, elles, le plus souvent indifférentes à l'inversion de la gauche et de la droite.

Perception de la symétrie et symétrie du cerveau

Par quel mécanisme la perception en miroir se réalise-t-elle dans le système visuel ? Depuis près de quatre-vingts ans, une hypothèse spéculative suscite intérêt et polémique parmi les psychologues. C'est la théorie d'Orton, selon laquelle la symétrie anatomique des deux hémisphères serait directement responsable de la confusion droite-gauche[312]. Dans les années 1920, le docteur Samuel Orton étudia les troubles de la lecture et tenta de les mettre en relation avec l'anatomie du cerveau. La théorie à laquelle il parvint représente l'une des premières tentatives d'expliquer les erreurs des enfants dyslexiques. À ce titre, elle présente un intérêt historique particulier. Bien sûr, à la lumière des connaissances modernes sur l'anatomie cérébrale, on peut juger un peu naïve son hypothèse d'une relation directe entre la symétrie du cerveau et la perception de la symétrie. Cependant, nous verrons que son modèle, une fois modernisé, conduit alors à des prédictions intéressantes et souvent correctes.

Que proposait Samuel Orton ? Constatant que l'hémisphère gauche est le symétrique presque parfait de l'hémisphère droit, il émit le curieux postulat que les deux hémisphères codent les informations visuelles selon des repères spatiaux inversés. Là où l'hémisphère gauche voit un « b », l'hémisphère droit verrait l'image symétrique, c'est-à-dire un « d » (figure 7.3). Orton n'expliquait guère le mécanisme neural de cette hypothétique inversion. Elle lui apparaissait comme une conséquence

évidente de la symétrie anatomique des deux hémisphères. Selon Orton, chaque région visuelle de l'hémisphère droit voit la même image que l'hémisphère gauche, mais en sens inverse, comme si la carte visuelle était retournée comme un gant. Ainsi Orton postulait-il que « le groupe de cellules excitées par un stimulus visuel donné dans l'hémisphère droit est l'image exacte en miroir de celui présent dans l'hémisphère gauche ».

De fil en aiguille, Samuel Orton déroulait ensuite les conséquences de son postulat initial. Si deux images mentales coexistent dans notre cerveau, l'une représentant l'objet réel et l'autre son symétrique, il est logique que nous confondions fréquemment notre droite et notre gauche. Mais comment parvenons-nous à déterminer l'orientation réelle du monde qui nous entoure ? Selon la théorie d'Orton, la seule solution est de n'utiliser qu'un hémisphère et faire taire l'autre. On sait depuis Broca que, pour nommer les lettres et les mots, une personne normale utilise principalement l'hémisphère gauche, siège des réseaux du langage. Selon Orton, lorsque nous lisons des mots, ce biais en faveur de la gauche nous aide à négliger les informations visuelles en provenance de l'hémisphère droit. En apprenant à n'utiliser que l'hémisphère gauche, nous parvenons progressivement à discriminer un « b » d'un « d ».

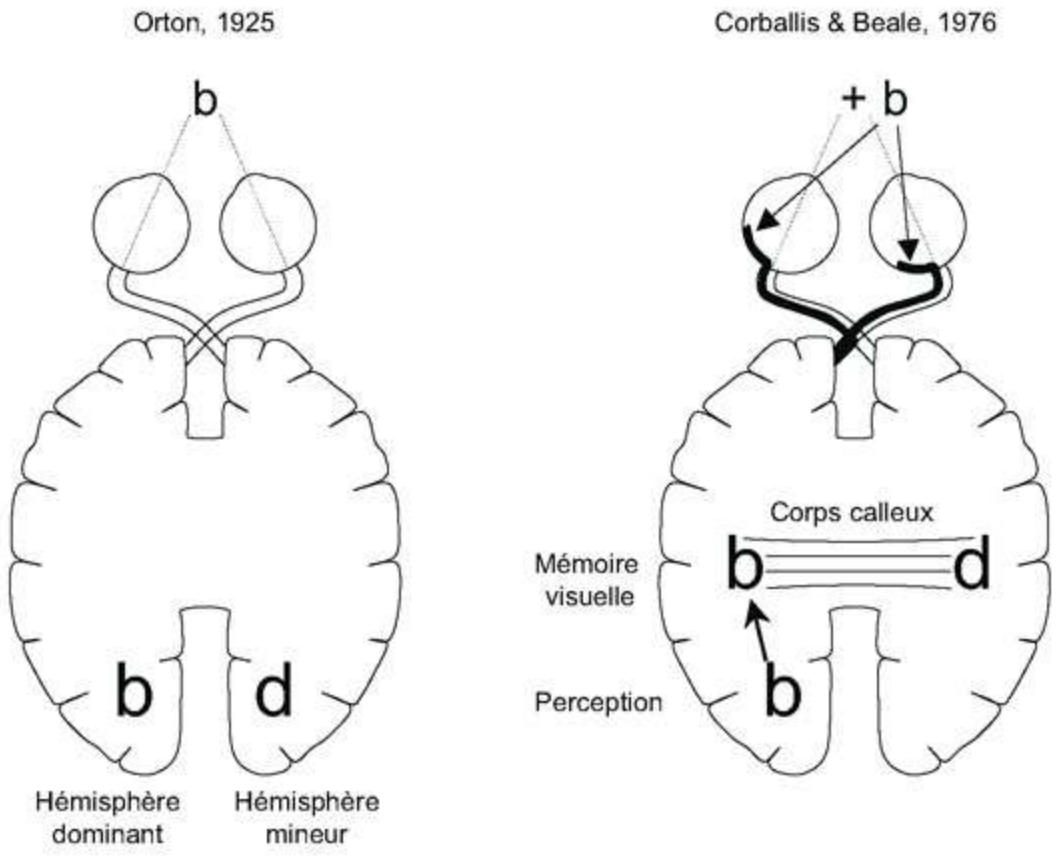


Figure 7.3 Deux théories neurologiques ont tenté d'expliquer les confusions des images en miroir. Selon Orton (1925), la symétrie du cerveau implique que chaque image est codée deux fois. Elle est représentée dans le bon sens dans l'hémisphère dominant, et dans le sens inverse dans l'hémisphère mineur. Les erreurs en miroir surviennent lorsqu'une personne ne parvient pas à inhiber le code de l'hémisphère mineur. Selon le modèle de Corballis et Beale (1976), plus conforme à nos connaissances modernes sur le système visuel, la présentation d'une lettre n'active initialement que les aires visuelles de l'hémisphère opposé (ici, l'hémisphère gauche). Cependant, un mécanisme actif de « symétrisation » transfère les objets de mémoire entre les hémisphères par l'intermédiaire du corps calleux. Au cours de ce transfert, la géométrie du corps calleux, qui connecte des points symétriques du cerveau, impose aux images une inversion gauche-droite. Selon Corballis et Beale, les confusions en miroir ne sont donc pas vraiment des erreurs de perception, mais résultent plutôt d'une généralisation excessive. Notre système visuel, au cours de l'évolution, aurait incorporé le fait que les images en miroir sont le plus souvent deux vues d'un seul et même objet.

Dernier élément de la théorie d'Orton : certaines personnes seraient affligées d'une mauvaise latéralisation hémisphérique. Ainsi ne parviendraient-elles pas à prêter attention aux entrées visuelles d'un seul hémisphère. Utilisant aléatoirement un hémisphère ou l'autre, elles mélangeraient la droite et la gauche, et ne pourraient pas distinguer deux images en miroir. Ce handicap constituait, pour Orton, une pathologie particulière qu'il appelait « stréphosymbolie » (retournement des symboles).

Comment cette théorie, conçue dans les années 1920, résiste-t-elle à quatre-vingts années de progrès des neurosciences ? Le modèle du cerveau

et de la vision que proposait Orton paraît aujourd'hui bien simpliste. Orton avait raison sur un point : les cartes visuelles qui occupent les régions occipitales des hémisphères gauche et droit sont effectivement organisées en miroir l'une de l'autre. Toutefois, dans la région visuelle primaire, contrairement à ce qu'imaginait Orton, il n'y a pas de duplication des images perçues dans les deux hémisphères. La réalité est bien plus simple : la moitié gauche du champ visuel se projette dans l'hémisphère droit, et la moitié droite se projette dans l'hémisphère gauche. Ainsi, lorsque nous voyons un « p » dans la partie droite du champ visuel, l'aire visuelle primaire de l'hémisphère gauche code ce « p », mais son homologue dans l'hémisphère droit ne code… rien, puisqu'elle ne reçoit pas d'informations visuelles de cette portion de l'espace.

Si l'on progresse plus avant dans la hiérarchie des aires visuelles, le problème d'Orton commence à se poser : les aires visuelles secondaires et tertiaires, plus éloignées de la rétine, répondent à des régions de plus en vastes du champ visuel. Il est donc vrai qu'un objet visuel, même unique, active des populations de neurones distribuées dans les deux hémisphères. Cependant, à ce niveau, le codage des informations visuelles devient de plus en plus abstrait, de moins en moins fidèle à la topographie de la rétine. Les deux groupes de neurones qui, dans les hémisphères droit et gauche, codent pour la lettre « p » ne sont donc plus vraiment organisés en cartes isomorphes, et ne sont pas « exactement symétriques » l'un de l'autre.

Autre pierre dans le champ d'Orton : même si les microcircuits neuronaux des deux hémisphères étaient symétriques, pourquoi cette symétrie du code neural devrait-elle nécessairement se traduire par des erreurs de perception en miroir ? Sur ce point, l'hypothèse d'Orton rappelle la naïveté de ceux qui, découvrant que le cristallin renverse les images sur la rétine, s'attendent à ce que le cerveau commence par les « remettre à l'endroit ». Elle évoque également la théorie de l'homunculus, ce petit bonhomme que l'on imagine placé aux commandes du cerveau, scrutant nos aires visuelles comme s'il s'agissait d'écrans d'ordinateur, et qui se laisserait induire en erreur lorsque l'un des écrans affiche les images à l'envers. Il faut, bien entendu, renoncer à cette image séduisante mais tellement simpliste de la vision. Il n'existe pas d'observateur intelligent caché dans notre cerveau. Notre système visuel n'a pas besoin d'afficher ses résultats pour qu'un observateur puisse les lire – il se contente d'extraire

l’information sous des formats toujours plus abstraits qui permettent de la comprendre, de la stocker et de l’exploiter pour guider nos actions.

Ainsi, et contrairement à ce que pensait Orton, il importe peu que la lettre « p » soit codée par un groupe de neurones dans un hémisphère, et par son symétrique dans l’autre : ces deux groupes fournissent un code tout aussi approprié de la lettre « p ». Prétendre que l’un de ces groupes est « dans le bon sens » et représente l’image véridique alors que l’autre la représente en miroir, est une erreur fondamentale – un peu comme si l’on affirmait que le mot « rouge » doit être codé par des neurones de couleur rouge, ou le mouvement des objets par des neurones qui se déplacent !

De surcroît, la vision de la latéralisation hémisphérique que propose Orton est également simpliste – si l’hémisphère gauche connaissait toujours la bonne orientation des objets, et le droit la mauvaise, nous devrions commettre des erreurs en miroir dans toutes sortes de tâches qui font plutôt appel à l’hémisphère droit, telles que la mémoire spatiale ou l’attention.

En bref, l’hypothèse d’Orton semble confondre le code et ce qu’il représente, le signifiant et le signifié. À l’époque d’Orton, il était sans doute difficile d’imaginer quel code neural, autre qu’une « image » à la surface du cortex, pouvait représenter un mot écrit. Ce n’est que récemment, grâce à l’avènement de l’informatique et de la théorie de l’information, que l’idée d’un codage abstrait s’est répandue. Nous comprenons à présent que n’importe quel système de marques peut servir à représenter de l’information, pourvu que ce code soit dépourvu d’ambiguïté et que l’on dispose d’un programme adéquat d’encodage et de décodage. Il n’est donc pas nécessaire que le code neural soit isomorphe de l’objet qu’il représente.

En dépit de toutes ces critiques, l’hypothèse d’Orton conserve une part de séduction. Réfuter sa théorie ne fait pas disparaître, comme par un coup de baguette magique, les faits qui lui ont donné naissance. Il existe bel et bien des personnes qui confondent leur droite et leur gauche et qui, parfois, lisent et écrivent en miroir. Il n’est pas rare que ces enfants soient gauchers, ou souffrent de troubles du langage, ce qui laisse soupçonner une mauvaise latéralisation des hémisphères. Serait-il donc possible de sauvegarder les éléments clés de la théorie d’Orton, tout en évitant les pièges dans lesquels il est tombé ?

Les émules contemporains du docteur Orton

Dans les années 1970, Michael Corballis et Ivan Beale, de l'Université d'Auckland, ont proposé une relecture moderne de l'hypothèse d'Orton[313]. Selon eux, et conformément aux données modernes des neurosciences, les aires visuelles des deux hémisphères analysent initialement leurs entrées de façon indépendante (voir la figure 7.3). Toutefois, la symétrie anatomique des aires visuelles entre en jeu lors du transfert de ces informations d'un hémisphère à l'autre. Corballis et Beale formulent l'hypothèse qu'à chaque fois qu'un hémisphère apprend une information visuelle nouvelle, cette trace de mémoire est immédiatement transmise à l'autre hémisphère. Il s'agirait là d'un mécanisme actif qui vise à maintenir la cohérence des deux hémisphères. Ce transfert passerait bien sûr par le corps calleux, ce vaste faisceau de fibres qui relie les aires correspondantes des deux hémisphères. En supposant que ce faisceau relie, point à point, les aires visuelles symétriques des deux hémisphères, alors le transfert entre hémisphères devrait inverser la droite et la gauche. C'est ainsi que chacun de nos souvenirs serait symétrisé. Il ne s'agirait que d'une conséquence triviale de la géométrie des connexions qui relient les deux hémisphères.

L'un des intérêts du modèle de Corballis et Beale est qu'il ne suppose pas que la perception elle-même soit perturbée par la symétrie. Au cours des premières étapes du traitement visuel, nous percevons correctement le monde extérieur, dans la bonne orientation, et cette étape de traitement permet de guider efficacement l'action – nous pouvons, par exemple, tracer le contour de la lettre « b » sans en inverser les deux côtés. Ce n'est que dans un second temps que les connaissances que nous avons acquises sur l'objet sont généralisées en miroir. C'est pourquoi, dans notre mémoire visuelle, nous ne nous souvenons plus de l'orientation dans laquelle nous avons vu la Joconde ou la Semeuse.

Prenons un exemple concret. Lors de son premier cours de lecture, un enfant voit pour la première fois la lettre « b », et apprend qu'elle se prononce *bé*. Supposons que cette première image se soit trouvée dans la partie gauche du champ visuel. Elle est donc codée initialement dans l'hémisphère droit, où des populations de neurones se modifient afin d'établir la connexion entre la lettre et le son. Une fois mémorisée, cependant, cette information est transférée à l'autre hémisphère, où la forme

du « b » devient un « d ». Cette deuxième forme, elle aussi, devient donc associée au même son *bé*. Si, le lendemain, l'enfant voit la forme « d » dans son champ visuel droit, il affirmera avec confiance qu'il s'agit d'un *bé*. À sa grande surprise, la maîtresse lui explique que non, cette lettre se prononce *dé*. Ce nouveau savoir se met en place… mais il déstabilise aussitôt, dans l'autre hémisphère, la connaissance acquise la veille sur la lettre « b ». Pour parvenir à lire, selon Corballis et Beale, l'enfant devra apprendre à inhiber la généralisation par symétrie : il lui faudra cesser de voir les lettres « b » et « d » comme un seul et même objet, vu sous des angles différents. Ce désapprentissage constitue une étape difficile pour l'enfant, et il se peut qu'il pose des problèmes insurmontables à certains enfants dyslexiques.

Pourquoi le modèle de Corballis et Beale ne souffre-t-il pas des mêmes difficultés logiques que celui d'Orton ? Parce qu'il n'affirme pas que le code neural d'un hémisphère est dans le bon sens, alors que l'autre est à l'envers. Il se contente de soutenir que le transfert interhémisphérique en miroir rend le code neural ambigu. Après transfert, le groupe de neurones activés par un « b » présenté dans le champ visuel gauche est identique à celui activé par un « d » dans le champ visuel droit. Ainsi, les aires cérébrales ultérieures, qui analysent ces signaux, ne disposent d'aucune information qui permette de différencier ces deux perceptions : l'information sur l'orientation des lettres n'est tout simplement pas codée en mémoire.

S'il réduit l'information disponible, pourquoi un tel mécanisme d'apprentissage symétrique aurait-il été sélectionné par l'évolution ? Parce qu'il constitue une manière simple de généraliser, et donc de tirer avantage des symétries du monde extérieur. Un organisme qui en est doté reconnaîtra sans difficulté un tigre, que celui-ci soit tourné vers la droite ou vers la gauche.

Dans le modèle de Corballis et Beale, le maintien actif de la symétrie du plan du cerveau est le mécanisme élémentaire qui permet cette généralisation en miroir. Ils supposent en effet que les organismes qui en sont dotés disposent dès la naissance de connexions visuelles qui relient précisément point à point les régions symétriques des deux hémisphères, et que l'apprentissage maintient au cours du développement ultérieur. Notons qu'il n'est pas si difficile, à l'aide de quelques gènes et de gradients spatiaux, d'envisager que les connexions du corps calleux se mettent en

place, dans les toutes premières étapes de développement du système nerveux, de façon à connecter point à point les régions symétriques du cerveau – tout comme les ailes du papillon s'épanouissent avec une symétrie parfaite[314]. Avant même toute interaction avec son environnement, le cerveau incorporerait ainsi la symétrie gauche-droite comme une propriété essentielle de l'espace. Nous serions précâblés pour généraliser par symétrie, ce qui constituerait un avantage pour la reconnaissance de la plupart des objets. Pour conserver cet avantage, toutefois, notre cerveau devrait s'efforcer de préserver sa symétrie initiale. D'où l'importance du mécanisme postulé par Corballis et Beale : chaque fois qu'un épisode d'apprentissage vient modifier les connexions neuronales dans un hémisphère, le passage par le corps calleux assure le transfert de cet apprentissage à l'autre côté, rétablissant immédiatement la symétrie.

Les limites d'un organisme symétrique

Imaginons que nous soyons de parfaites « machines de Corballis » – des organismes idéalement symétriques, dont la moindre des connexions soit dupliquée en miroir dans l'autre hémisphère. Quel serait alors notre comportement ? Pourrions-nous encore nous déplacer dans l'espace, distinguer la droite de la gauche, nommer les objets qui nous entourent ? Quels types d'erreurs ferions-nous, et peut-on les mettre en rapport avec le comportement des jeunes enfants ou des adultes dyslexiques ?

Dissipons d'abord un malentendu fréquent. Même si un organisme est parfaitement symétrique, jusque dans les moindres détails de son système nerveux, cela n'implique pas pour autant que ses actions ne différencient jamais la droite de la gauche. En fait, un tel organisme peut faire des réponses spatialement orientées à des situations également orientées. Imaginons en effet un organisme symétrique qui observe une scène asymétrique, par exemple un tigre venant de la droite. Supposons qu'il soit câblé de telle sorte que sa réponse immédiate soit de courir vers la gauche. Alors, la symétrie de l'organisme implique que, en réponse au symétrique de l'image de départ (un tigre venant, cette fois, de la gauche), l'organisme effectuera l'action symétrique (courir vers la droite). Un observateur en conclurait que notre hypothétique organisme, quoique parfaitement symétrique, distingue convenablement sa droite de sa gauche.

C’est seulement lorsqu’on lui demande d’effectuer une réponse conventionnelle, sans orientation spatiale, qu’un tel organisme fait nécessairement la même réponse à deux vues en miroir l’une de l’autre. Par exemple, un organisme symétrique peut dire le mot « tigre » dès qu’il en voit le profil droit – mais la symétrie de son plan corporel l’obligera alors à produire la même réponse au profil gauche du tigre. Autrement dit, il saura reconnaître et nommer un tigre quelle que soit son orientation, même nouvelle.

Posséder un système nerveux symétrique et le conserver au fil de l’apprentissage présentent donc un double avantage :

— la symétrie du plan cérébral permet de reconnaître les propriétés des objets de façon invariante, indépendamment de leur orientation gauche-droite ;

— mais elle n’empêche pas pour autant de coder leur orientation dans l’espace, et d’y répondre par des actions spatiales adaptées, y compris des actions asymétriques.

Il y a seulement deux sortes d’opérations que ne peut pas faire un organisme parfaitement symétrique.

• La première est d’émettre une réponse arbitraire à un objet asymétrique sans l’étendre à son image miroir. Pour un enfant, cela consisterait, par exemple, à nommer *bé* la forme « b », mais pas la forme « d » ; ou à dire *gauche* si l’on voit une main gauche, mais pas une main droite. Ou encore, pour un pigeon, cela pourrait être de picorer s’il voit une barre inclinée à droite (/), mais non s’il voit la même barre inclinée à gauche (\). Un organisme parfaitement symétrique ne peut réaliser aucune de ces tâches, même si elles nous paraissent très simples.

• La seconde opération inaccessible à un organisme symétrique est d’effectuer une action spatiale asymétrique en réponse à un ordre arbitraire qui ne soit pas organisé dans l’espace. Par exemple, il serait impossible à un tel organisme de lever seulement le bras droit s’il entend le mot « droite ». Les connexions qui relieraient les aires auditives aux commandes motrices du bras droit devraient, par symétrie, également entraîner un mouvement symétrique du bras gauche. On s’attendrait donc à ce qu’un tel organisme effectue des mouvements symétriques – ou, si un peu de hasard s’insinue dans son comportement, à ce qu’il lève tantôt la main droite, tantôt la gauche, en réponse à une commande verbale.

Il est fascinant de constater à quel point ces limitations théoriques des organismes symétriques coïncident avec les difficultés qu'éprouvent les animaux et les jeunes enfants. Aucun enfant n'a de mal à nommer un objet qu'il connaît, même s'il le voit pour la première fois sous une orientation nouvelle. Aucun enfant normal ne bouge son bras gauche lorsqu'il tient une balle dans la main droite ! Par contre, tous les enfants éprouvent initialement des difficultés à distinguer les lettres « b » et « d » ou à identifier leur main droite.

En dépit de son aspect improbable, le concept d'un cerveau symétrique et qui maintient activement sa symétrie au fil de l'apprentissage mérite donc notre attention, car il semble rendre compte de certaines limites de notre appareil cérébral. Existe-t-il la moindre preuve que le transfert d'information entre les deux hémisphères inverse les formes en miroir, comme le postule la théorie de Corballis et Beale ? Toute la discussion qui précède pourrait paraître naïvement géométrique et sans lien avec la biologie s'il n'y avait pas quelques données expérimentales surprenantes qui, en accord avec la théorie, tissent des liens entre le sens de la symétrie et la symétrie du cerveau.

Les neurones de la symétrie

Quelles sont donc les bases neurales de la perception de la symétrie ? Bien que la neurophysiologie s'intéresse à cette question depuis peu, plusieurs expériences montrent que la symétrie en miroir fait partie des invariants qui sont extraits par les neurones de la région temporale inférieure – celle-là même qui, chez l'homme, se recycle partiellement pour la lecture.

Souvenez-vous que ces neurones répondent à certains objets visuels et sont insensibles aux translations et aux changements de taille. Un neurone donné, qui préfère par exemple le visage de Jennifer Aniston à tout autre visage, conservera cette préférence indépendamment de la taille et de la position du visage sur la rétine. Récemment, les neurophysiologistes ont découvert que certains de ces neurones sont également invariants pour la symétrie en miroir[315] : leur profil de préférence, à travers toute une série d'objets, reste le même lorsque les images subissent une inversion gauche-droite.

De plus, ces neurones résistent mieux à la symétrie horizontale qu'à la symétrie verticale. En effet, lorsque l'on mesure leur réponse à la même forme présentée sous diverses orientations, on observe que les neurones ont souvent des préférences pour une orientation verticale, mais beaucoup plus rarement des préférences selon l'axe gauche-droite. Si un neurone répond à une forme donnée, disons « p », il déchargera souvent avec le même profil de réponse à la forme « q », c'est-à-dire son symétrique selon l'axe gauche-droite. Par contre, ce même neurone ne répondra pas nécessairement avec la même force aux formes symétriques selon l'axe haut-bas. Autrement dit, un tel neurone distingue un « p » d'un « b », mais pas un « p » d'un « q ».

Collectivement, les neurones du cortex temporal inférieur réalisent les opérations d'invariance perceptive. Ce sont eux qui nous permettent de reconnaître les objets, quelle que soit leur taille et leur orientation. Ces nouvelles données électrophysiologiques indiquent donc que la différence entre gauche et droite fait partie des différences que le cortex temporal néglige.

D'après la théorie de Corballis et Beale, cette invariance par symétrie ne doit pas être apprise : elle fait partie des invariants structuraux que la géométrie de nos connexions interhémisphériques nous permet de reconnaître spontanément. Les travaux du neurophysiologiste Nikos Logothetis[316] appuient cette hypothèse (figure 7.4). Logothetis a entraîné des singes macaques à reconnaître des objets tridimensionnels inhabituels, des sortes de trombones en fil de fer formés de multiples segments de droite pliés selon des angles aléatoires. Logothetis voulait savoir si, une fois que les singes avaient appris à reconnaître ces formes dans une orientation donnée, ils seraient capables de les reconnaître dans n'importe quelle orientation. C'est pourquoi, au cours de l'apprentissage, les singes ne voyaient les objets que sous un angle presque fixe. Les objets ne tournaient que de quelques degrés, afin de créer une illusion de profondeur. Cet entraînement minimal suffirait-il à reconnaître ultérieurement l'objet sous tous ses angles ? Pour le savoir, Logothetis présenta ensuite à l'animal toutes les vues possibles de l'objet, mélangées à des images d'autres objets.

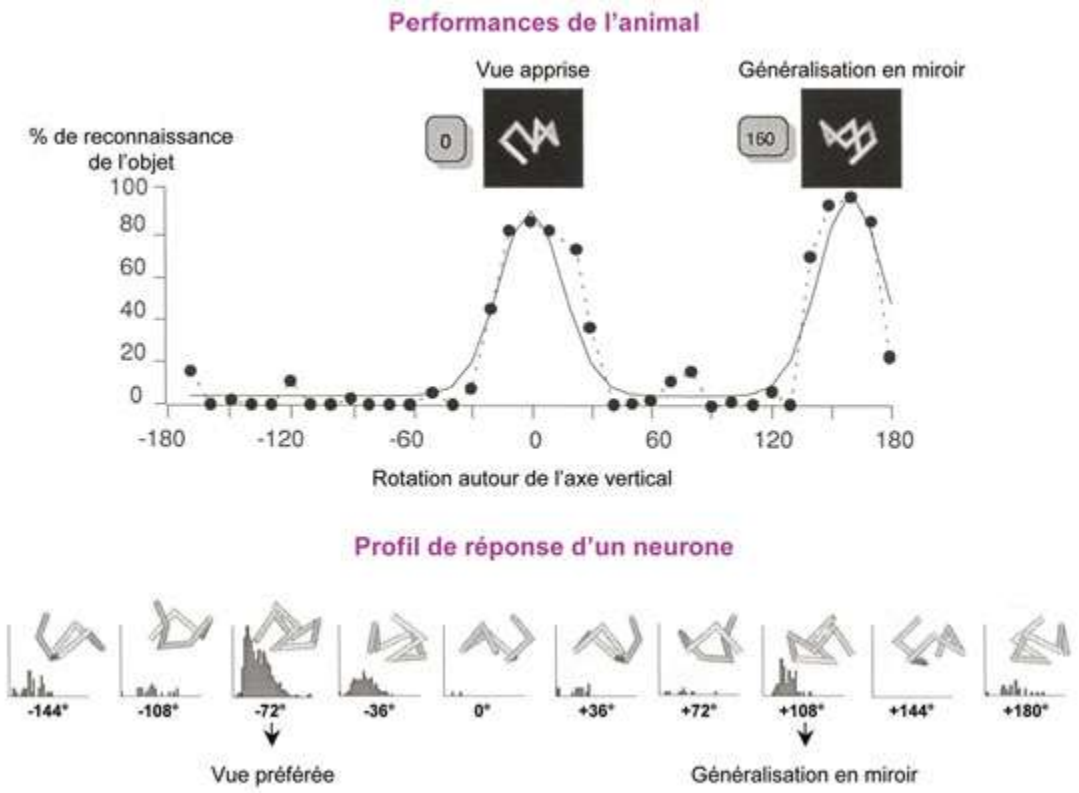


Figure 7.4 Après un apprentissage, le système visuel des primates généralise en miroir. Dans cette expérience, l'animal a appris à reconnaître un objet en fil de fer sous un angle particulier. On le teste ensuite avec le même objet vu sous différents angles (graphe du haut). Le singe ne reconnaît l'objet que s'il le voit sous l'angle de départ ou sous un angle d'environ 180 °, qui correspond à une symétrie en miroir. En bas, un neurone qui a appris à répondre à une vue particulière d'un objet répond également à la même vue tournée de 180 ° (d'après Logothetis 1995).

Les résultats montrèrent que, dès que l'orientation nouvelle s'écartait d'environ 40 degrés de celle apprise, le singe ne parvenait pas à reconnaître l'objet appris. Cependant, lorsque l'on atteignait une rotation de 180 degrés, le taux de reconnaissance augmentait brutalement. Même chose pour les neurones du cortex temporal inférieur : la plupart des neurones qui déchargeaient maximalement lorsque l'objet était dans l'orientation apprise cessaient progressivement de répondre lorsque l'objet était tourné de 40 ou 50 degrés, mais certains reprenaient un taux de décharge vigoureux lorsque la rotation atteignait 180 degrés (figure 7.4). Or, 180 degrés, c'est bien entendu un demi-tour, et pour des objets faits de fil de fer, cela correspond presque exactement au symétrique de l'image de départ (si vous fabriquez une lettre « b » en fil de fer, vous pouvez la transformer en un « d » en la tournant de 180 degrés autour de la verticale).

Ainsi, sans aucun apprentissage supplémentaire, les neurones du cortex temporal inférieur parviennent-ils à reconnaître le symétrique d'une forme connue. Cette conclusion est corroborée par l'étude des neurones qui, dans la même région du cortex, répondent sélectivement à la vue d'un visage. Nombreux sont les neurones qui répondent à des vues symétriques d'un même visage, par exemple les profils droit et gauche[317]. De plus, cette invariance en miroir est déjà présente dans les neurones du singe nouveau-né[318]. Chez l'homme, les bébés de 4 mois eux aussi reconnaissent une image à laquelle ils ont été familiarisés lorsqu'on la présente une seconde fois en image miroir[319]. La symétrie en miroir semble s'appliquer, dès le plus jeune âge, à tous les objets que nous sommes susceptibles de reconnaître.

Les recherches de Logothetis révèlent un intéressant contraste entre la rotation et la symétrie. L'invariance par rotation ne fait pas partie des compétences initiales de notre système visuel. Nous devons apprendre à quoi ressemblent les différentes vues d'un objet en rotation. Notre système visuel ne semble pas connaître les formes en trois dimensions : il ne fait qu'interpoler entre les vues que nous avons appris à reconnaître. Il est d'autant plus fascinant que la symétrie échappe à cette règle et fait partie des opérations les plus élémentaires de notre appareil perceptif. Des expériences d'imagerie cérébrale ont récemment démontré, tant chez le singe macaque que chez l'homme, une remarquable sensibilité à la symétrie : au milieu d'un nuage aléatoire de points, la présence de points répartis de façon symétrique augmente la réponse des régions latérales du cortex occipito-temporal, et la faculté de les détecter est directement liée à cette augmentation d'activité neurale[320]. Bien que ce stimulus aléatoire n'ait jamais été vu auparavant, il entre en résonance avec des circuits visuels prêts à se déclencher à la moindre indication de symétrie.

Symétrie des connexions

Malheureusement, aucune expérience de physiologie n'a encore exploré quelle géométrie des connexions corticales sous-tend la perception de la symétrie dans le cortex temporal inférieur. Le corps calleux, avec ses connexions symétriques qui relient les deux hémisphères, détient-il les clés de la perception de la symétrie, comme le postulent Corballis et Beale ? Nous en sommes actuellement réduits à spéculer sur la base de données

fragmentaires, quoique suggestives. J'ai déjà cité les premières expériences de Pavlov chez le chien et de Beale chez le pigeon. Ces animaux éprouvent de grandes difficultés à distinguer des paires de stimuli symétriques. Un pigeon, par exemple, apprend facilement la différence entre une barre horizontale et une verticale (— et |) mais éprouve des difficultés lorsque les mêmes barres sont présentées en diagonale, de sorte qu'elles deviennent symétriques l'une de l'autre (╱ et ╲). Tant Pavlov que Beale avaient noté qu'après la section du corps calleux, cette différence de difficulté disparaît, ce qui suggère que les connexions calleuses jouent un rôle dans le sens de la symétrie.

Mais quel rôle exactement ? D'autres données confirment que le transfert des informations d'un hémisphère à l'autre, par l'intermédiaire du corps calleux, peut retourner l'espace comme un gant en inversant la droite et la gauche. Dans les années 1960, Nancy Mello, de l'Université Harvard, a publié une série d'articles sur l'apprentissage visuel et le sens de la symétrie chez le pigeon[321]. Cette espèce présente une caractéristique anatomique bien utile : contrairement à l'organisation qui prévaut chez les mammifères, l'œil droit du pigeon projette uniquement vers les aires visuelles de l'hémisphère gauche, et l'œil gauche vers l'hémisphère droit. Ainsi, lorsqu'on masque l'un des yeux du pigeon, on peut projeter des informations visuelles à destination d'un seul hémisphère à la fois.

Nancy Mello a donc entraîné des pigeons à discriminer, d'un seul œil, deux images visuelles, par exemple ∧ et ∨, ou bien ◁ et ▷. Les pigeons étaient renforcés par de la nourriture s'ils picoraient l'une des formes, mais pas l'autre. Une fois cette discrimination établie, Nancy Mello examinait sa généralisation à l'autre œil. Surprise ! Alors que les pigeons ne faisaient pas d'erreur lorsque les images différaient par une symétrie verticale (∧ et ∨), ils échouaient systématiquement avec les images qui différaient par une symétrie gauche-droite. Un pigeon entraîné à répondre à la forme ◁ vue par l'œil droit, se mettait à répondre à la forme ▷ lorsqu'on la lui présentait dans l'œil gauche. Il y avait donc bien transfert d'apprentissage – mais ce transfert s'accompagnait d'une inversion gauche-droite, en accord avec la théorie de Corballis et Beale.

Une année plus tard, un travail comparable était publié chez une espèce plus proche de la nôtre, le singe macaque. Après section du chiasma optique, forçant ainsi chaque œil à projeter vers un seul hémisphère, John

Noble, de University College à Londres, entraîna ses animaux à discriminer deux objets symétriques à l'aide d'un seul œil, puis testa la généralisation à l'autre œil. Lui aussi observa une généralisation paradoxale en faveur de l'image miroir. Après une courte période de réponse au hasard, les animaux se mettaient à répondre *moins bien* qu'au hasard : comme les pigeons, ils choisissaient systématiquement la mauvaise forme, symétrique de celle qu'on leur avait initialement appris à préférer.

Dans des expériences ultérieures, John Noble montra que le transfert d'un œil à l'autre pouvait passer soit par le corps calleux, soit par un autre faisceau de fibres, la commissure antérieure : la section des deux faisceaux abolissait le transfert en miroir, alors que celui-ci persistait dès que l'un de ces deux faisceaux était intact. Enfin, Noble opéra une section du corps calleux après l'apprentissage, mais avant le test. Chez ces animaux, le transfert paradoxal en miroir avait toujours lieu, ce qui montrait qu'il survenait au cours de l'apprentissage et non pendant le test.

Noble concluait donc que, chez le singe, chaque épisode d'apprentissage dans un hémisphère s'accompagne d'un apprentissage en miroir dans l'autre hémisphère. Il notait d'ailleurs que ce mécanisme pouvait expliquer les difficultés particulières qu'éprouvent les animaux, mais aussi les êtres humains, à discriminer des objets qui ne se distinguent que par une symétrie gauche-droite. En vision binoculaire, le mécanisme d'apprentissage symétrique qui passe par le corps calleux assure que chaque hémisphère reçoit une entrée visuelle directe, véridique, et une entrée indirecte, symétrique de l'original. Lorsque l'objet initial est symétrique, les deux représentations sont identiques et se renforcent. Par contre, lorsque nous devons discriminer des images en miroir, les deux représentations sont antagonistes, et ce conflit interne ralentit l'apprentissage, même si la représentation directe finit par l'emporter.

Si ces raisonnements sont justes, un principe de symétrie devrait se révéler dans l'anatomie même des connexions calleuses. On devrait trouver des voies de projection nerveuses qui relient, point à point, des régions symétriques des aires visuelles. Tel est effectivement le cas[322], et cela constitue un élément de plus en faveur du modèle de Corballis et Beale. La géométrie de ces connexions est remarquable : un neurone situé dans l'aire visuelle primaire de l'hémisphère gauche envoie un axone qui quitte cette région selon un axe perpendiculaire au cortex, rejoint le faisceau des

connexions du corps calleux, rejoint l'hémisphère opposé, puis, en un point bien précis, pique vers le cortex et atteint le symétrique exact de son point de départ (figure 7.5). De tels neurones ont été observés dans l'aire visuelle primaire du rat et de la souris, et dans l'aire visuelle secondaire du macaque. On ne connaît pas leur fonction, mais leur géométrie paraît idéale pour symétriser les informations visuelles et faciliter la détection des objets symétriques.

Si ces connexions symétriques ont parfois été négligées, c'est parce qu'elles ne constituent qu'une fraction des connexions qui relient les aires visuelles des deux hémisphères. Le faisceau de connexions le plus facilement identifiable n'est pas symétrique, mais relie les représentations de la région centrale du champ visuel dans les deux hémisphères, dont il assure la continuité. La vision soulève en effet un paradoxe bien connu : subjectivement, nous ne percevons aucune discontinuité dans notre champ visuel, alors qu'objectivement il est découpé en deux moitiés : la partie gauche est représentée dans l'hémisphère droit, et la partie droite dans l'hémisphère gauche (voir la figure 7.5). Il est probable que les connexions interhémisphériques jouent un rôle essentiel dans le maintien de cette continuité fonctionnelle en dépit de la séparation anatomique. Ces connexions se concentrent en effet sur la région de discontinuité (l'axe vertical), et relient point à point les secteurs des aires visuelles droite et gauche qui codent pour la même position visuelle. Une véritable couture s'établit et rétablit la continuité fonctionnelle des deux demi-cartes.

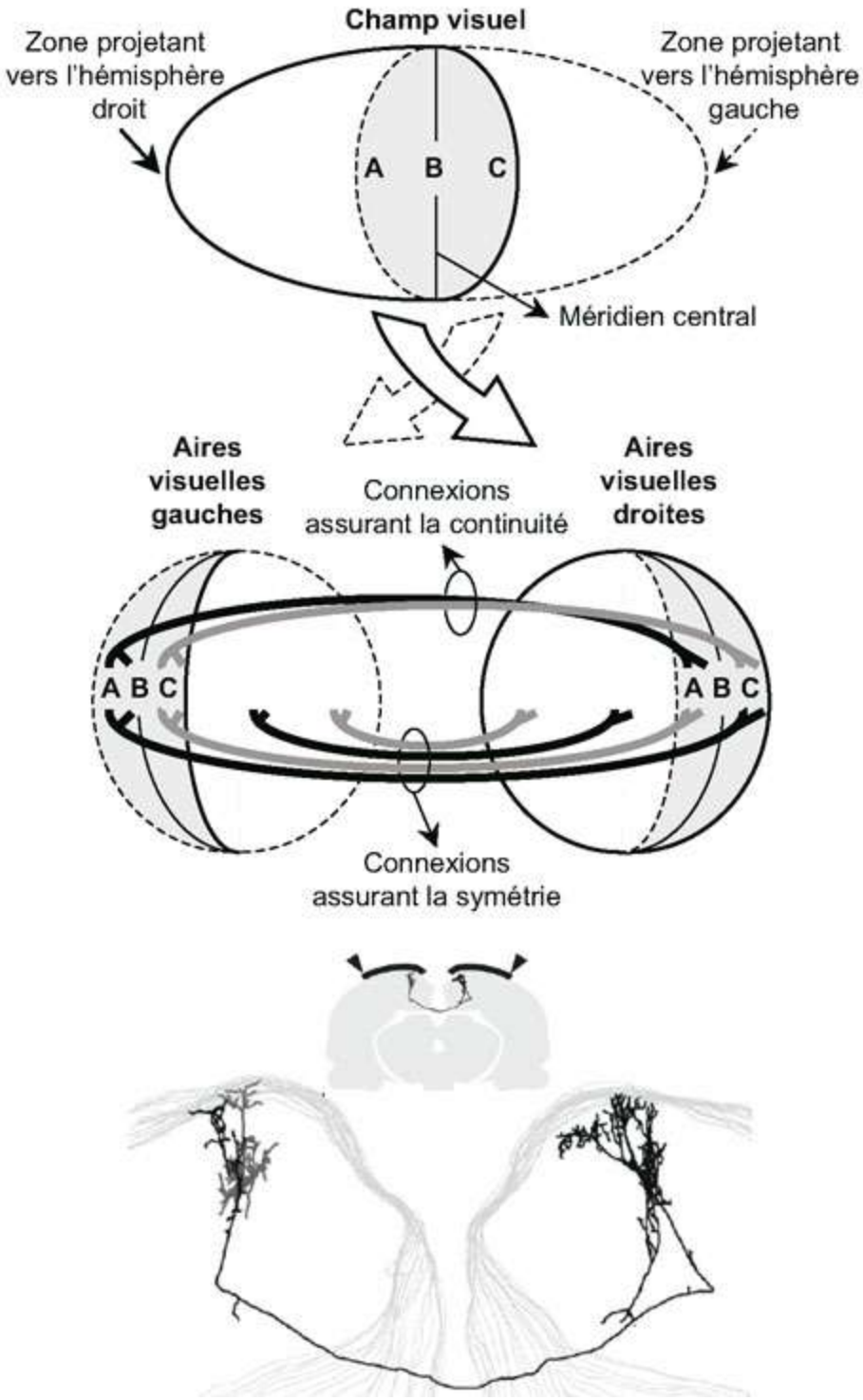


Figure 7.5 Continuité et symétrie en miroir sont les deux principes d'organisation des connexions visuelles qui relient les deux hémisphères. Le diagramme du haut, inspiré des travaux d'Olavarria et coll. (2003) chez le rat, rappelle que la moitié gauche du champ visuel est codée dans l'hémisphère droit, et la moitié droite dans l'hémisphère gauche, avec seulement une faible zone de recouvrement. Si nous ne percevons aucune discontinuité, c'est qu'une partie des connexions entre les hémisphères assure la continuité fonctionnelle du champ visuel en reliant les régions du cortex qui codent pour le même point du champ visuel. Ces connexions ne concernent que la région du méridien central, et ne sont pas symétriques mais décalées par translation. Cependant, il existe d'autres connexions interhémisphériques qui relient des points symétriques du champ visuel, y compris dans leur

périphérie. Leur rôle pourrait être d'assurer la perception de la symétrie et la symétrisation des apprentissages. La figure d'en bas montre l'étonnante géométrie d'un neurone de l'aire visuelle primaire du rat, qui relie des régions visuelles symétriques des hémisphères droit et gauche (d'après Houzel et coll., 2002).

Les travaux de Jaime Olavarria et ses collègues de Seattle ont montré qu'il existe une compétition, au cours du développement, entre le principe de continuité du champ visuel et le principe de symétrie[323]. Les connexions symétriques sont présentes dès la naissance, sans doute mises en place par des gradients d'attraction chimique. Cependant, elles sont en grande partie éliminées, dans les premiers jours de vie, au profit des connexions qui assurent la continuité du champ visuel. C'est l'activité neuronale spontanée, issue de la rétine, qui semble constituer le signal permettant aux neurones des régions droite et gauche de « savoir » qu'ils codent pour un même point du champ visuel. En effet, la mise en place des connexions de couture a lieu chez le rat plusieurs jours avant l'ouverture des yeux, et elle ne se produit pas si l'on perturbe l'activité en provenance de la rétine, par exemple chez l'animal énucléé. Dans ce dernier cas, on observe un excès de connexions symétriques. Ces observations chez l'animal en développement sont très intéressantes, car elles suggèrent que des pathologies très précoces de l'élimination synaptique, dans les derniers mois de la grossesse et les premiers mois de vie chez l'homme, pourraient engendrer un excès de symétrie des connexions visuelles. Un tel foisonnement de connexions pourrait-il expliquer que certains enfants aient tant de difficultés à distinguer leur droite de leur gauche, ou les lettres symétriques « b » et « d » ? Avant d'en débattre, il nous faut d'abord examiner par quels mécanismes notre cerveau parvient finalement à faire ces distinctions.

Le symétrique qui sommeille

Si notre système visuel ne faisait que symétriser tout ce qu'il apprend, nous commettrions tous, en permanence, des erreurs en miroir – il nous serait strictement impossible de distinguer les « p » des « q » ou nos chaussures droite et gauche. Fort heureusement, une partie de nos aires visuelles préserve la distinction entre droite et gauche.

Comme l'ont noté de nombreux auteurs[324], tout se passe comme si nous avions, en fait, deux systèmes visuels au sein de notre cerveau. La voie occipito-temporale, sur laquelle j'ai insisté jusqu'à présent, s'intéresse à la

reconnaissance des objets. Elle est donc très sensible à l'identité, la forme et la couleur des images, mais s'intéresse peu à leur taille ou à leur orientation dans l'espace – et elle généralise par symétrie en miroir. Cependant, il existe une autre voie de traitement des informations visuelles, la voie occipito-pariétale, qui s'intéresse à la programmation de l'action. Pour elle, peu importe la couleur ou la nature exacte de l'objet. Seules comptent sa distance, sa position, sa vitesse et l'orientation de ses contours – tous les paramètres qui déterminent la manière dont nous pourrions agir sur un objet. David Milner et Mel Goodale résument en deux mots cette distinction fondamentale : le cortex ventral est la voie du « quoi », le cortex pariétal dorsal la voie du « comment ».

« Au commencement était l'action », dit le Faust de Goethe. Si nous parvenons, tant bien que mal, à distinguer notre droite de notre gauche, il semble bien que nous le devions à la voie du « comment ». Enfants, nous apprenons que notre main droite est celle qui dessine, écrit… ou fait le signe de croix ! Dans nos actions, nous n'avons aucune peine à distinguer des objets en miroir : notre système dorsal adapte automatiquement nos gestes à l'orientation des objets. Nous n'utilisons pas le même geste pour attraper une casserole tournée vers la droite ou vers la gauche, même si notre système ventral, guère sensible à l'orientation, nous affirme qu'il s'agit du même ustensile de cuisine. C'est le même système dorsal qui, bouclé sur lui-même, nous permet d'imaginer des gestes ou des mouvements virtuels. Par son biais, nous pouvons faire tourner les objets mentalement. Nous utilisons cette rotation mentale lorsque nous lisons une carte, ou lorsque nous jugeons dans quelle mesure deux images représentent le même objet vu sous des angles très différents.

En bref, tout se passe comme si nous étions habités par deux personnes bien différentes. L'une, que l'on pourrait appeler le « collectionneur », reconnaît et étiquette les objets, mais est incapable d'interagir avec eux ou même de percevoir leur orientation dans l'espace. L'autre, le « manuel », agit, compare, manipule… mais n'identifie pas les objets dont il analyse pourtant finement les contours[325].

Dans la vie normale, nos deux systèmes visuels collaborent étroitement, si bien que nous n'avons aucune conscience de leur division. Mais la pathologie cérébrale fait parfois resurgir les divisions internes. Oliver Turnbull, du département de psychologie de King's College à Aberdeen, en

Écosse, a étudié plusieurs dizaines de patients atteints de pathologies cérébrales, et a montré comment leur lésion induit une dissociation, parfois tranchée comme au fil du rasoir, entre les deux systèmes visuels. Considérez les cas de deux patients, monsieur D. M., qui a souffert d'un traumatisme crânien, et madame L. G., qui a subi de multiples attaques cérébrales dans la région temporo-pariétale droite[326]. Oliver Turnbull leur a présenté des images d'objets familiers dans toutes les orientations : un hélicoptère à l'envers, un kangourou dans son orientation normale, un téléphone tourné d'un quart de tour, etc. Lorsqu'il s'agit de les nommer, D. M. échoue lamentablement, alors que L. G. y parvient plutôt bien. Lorsqu'il s'agit de juger si les objets sont bien orientés, c'est le contraire : D. M. y parvient sans problème, même pour des objets qu'elle ne reconnaît plus, alors que L. G. éprouve de très grandes difficultés. Chez D. M., la voie ventrale du « quoi » est dramatiquement détériorée, alors que chez L. G. c'est la voie dorsale du « comment » qui ne fonctionne plus.

La même dissociation entre identité et orientation des objets s'observe d'ailleurs chez le singe macaque : les lésions temporales ventrales empêchent l'animal de distinguer des formes aussi simples qu'une croix et un rond, alors qu'elles n'ont aucune influence lorsque ces formes ne diffèrent que par leur orientation (par exemple un « 6 » et un « 9 », ou un « b » et un « d »). L'inverse est vrai des lésions pariétales : l'animal devient alors semblable à un jeune enfant, capable d'apprendre la différence entre un « a » et un « b », mais pas entre un « b » et un « d »[327].

Le système du « comment » comprend en fait de multiples aires cérébrales, dont on commence à peine à comprendre l'organisation. Certaines régions s'intéressent plutôt aux gestes des mains, d'autres aux mouvements des yeux. Pour d'autres régions encore, la division pertinente concerne la nature des relations spatiales qui sont codées. Distance, mais aussi taille, nombre, forme, mouvement, orientation des objets font appel à des régions partiellement spécialisées. C'est ainsi que, chez certains patients, particulièrement à la suite de lésions de la région pariétale droite, seule la distinction entre droite et gauche ne fonctionne plus. La lésion révèle alors le symétrique qui sommeille dans le système ventral.

Oliver Turnbull et Rosaleen McCarthy ont décrit l'un des premiers cas vraiment convaincants de ce syndrome de cécité pour les images miroir : le patient R. J., un homme de 61 ans qui avait souffert de lésions bilatérales du

lobe pariétal consécutives à un infarctus du myocarde[328]. Monsieur R. J. affirmait dur comme fer qu'il ne voyait *aucune* différence entre un objet et son image miroir. Si on les superposait, il admettait que les deux images ne s'alignaient pas parfaitement. Mais, dès qu'on les écartait, il ne voyait plus de différence. « Je sais d'après ce que vous avez fait qu'elles doivent être différentes – et pourtant quand j'en regarde une, puis l'autre, elles me paraissent absolument identiques », disait-il.

Afin d'explorer cette pathologie étrange, Turnbull et McCarthy ont présenté à leur patient trois images presque identiques. Parmi elles se glissait un intrus que monsieur R. J. devait tenter de détecter. R. J. n'éprouvait aucune difficulté à repérer de minuscules différences de détail, par exemple un lapin avec quatre oreilles parmi deux lapins normaux. Il savait, de même, repérer un lapin sur le dos. Mais il était incapable de repérer le lapin orienté vers la droite parmi d'autres lapins orientés vers la gauche (figure 7.6). Plusieurs autres cas très similaires de « cécité en miroir » ont été décrits depuis lors[329]. De multiples tests de contrôle montrent que seule l'inversion droite-gauche leur pose des problèmes majeurs. Qu'il s'agisse de dessins d'animaux, d'outils, ou d'objets totalement nouveaux en fil de fer, ces patients éprouvent d'immenses difficultés à les distinguer de leur image en miroir. Tout se passe comme si, ayant perdu les informations d'orientation gauche-droite fournies par la voie visuelle dorsale, ils se reposaient désormais sur la seule voie ventrale, aveugle à l'orientation.

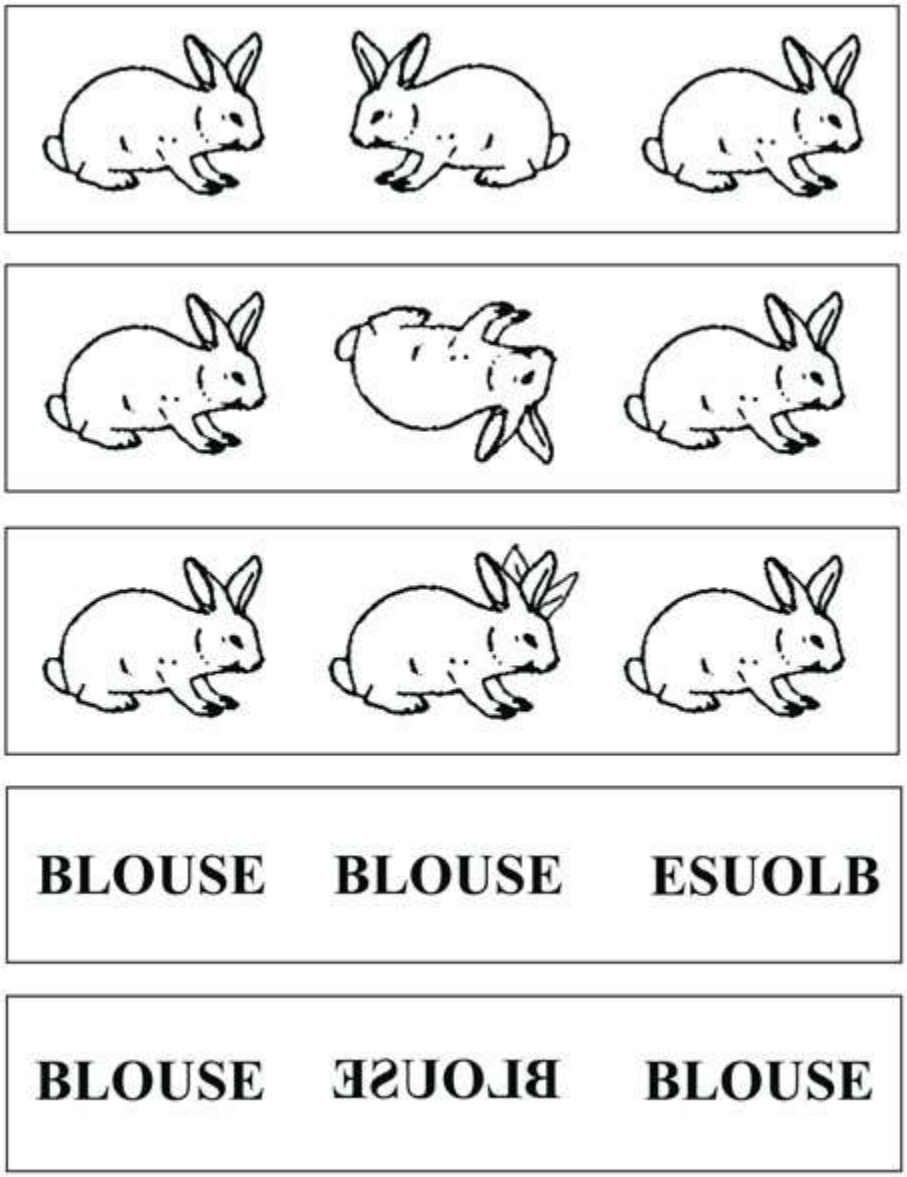


Figure 7.6 À la suite d'une lésion cérébrale, certains patients ne parviennent plus à distinguer les images en miroir. Le test de l'intrus a été développé par Oliver Turnbull et Rosaleen McCarthy (1996) afin de tester la perception de l'orientation spatiale. Dans chaque rangée, il faut détecter l'image qui diffère des autres. Le patient R. J. échouait uniquement lorsque la différence portait sur l'orientation droite-gauche des images (rangée du haut), mais réussissait tous les autres tests, y compris ceux qui portaient sur l'orientation des mots (rangées du bas).

La lecture, ou quand le miroir se brise

Il existe toutefois une exception, et celle-ci nous ramène au cœur de notre sujet : la lecture. Lorsqu'ils voient des mots écrits, ni monsieur R. J. ni aucun des autres patients qui souffrent de troubles de l'orientation gauche-droite n'éprouvent de difficultés. Tous parviennent à les lire, et à

repérer immédiatement s’ils sont écrits à l’endroit ou à l’envers. Éliminer les intrus dans une liste de mots leur est facile, que ceux-ci soient formés par inversion de lettres individuelles (RAISON-ꓤSIAꓤ), du mot entier (SOURIS-SIRUOS), ou des deux à la fois (LAPIN-ИIPAJ). Toutes ces modifications leur sautent aux yeux, comme à ceux de n’importe quel bon lecteur – alors que, répétons-le, ils ne perçoivent pas la moindre différence entre des formes non linguistiques telles que ☜ et ☞.

Ainsi se confirme que l’écriture obéit à des règles particulières – lorsque nous devenons des experts de la lecture, notre système ventral désapprend la symétrie en miroir. Au début de l’apprentissage de la lecture, pour distinguer les lettres en miroir, comme « b » et « d », nous avons initialement besoin des informations sur l’orientation spatiale que fournit notre système dorsal. Lui seul peut nous dire si la lettre est tournée vers la droite ou vers la gauche, car notre système ventral nous dit qu’il s’agit d’un seul et même objet vu sous deux angles différents. Progressivement, cependant, notre système ventral parvient à briser sa symétrie. Il apprend à ne plus considérer « b » et « d » comme deux vues différentes du même objet. Sans doute leur assigne-t-il des détecteurs neuronaux spécialisés qui ne généralisent plus en miroir. Ces détecteurs servent de point d’entrée à la compilation de toutes sortes de statistiques sur les lettres et les mots, qui ne s’appliquent qu’au sens normal de la lecture. Se développe alors, comme nous l’avons vu, une hiérarchie neuronale spécialisée pour la reconnaissance visuelle des mots et qui, contrairement à ses voisines spécialisées pour les objets ou les visages, cesse de confondre les images en miroir.

Cette rupture de symétrie semble ne se produire que pour les caractères écrits. Encore faut-il que le système d’écriture lui-même soit asymétrique, ce qui n’est pas toujours le cas. Les hiéroglyphes égyptiens s’écrivaient indifféremment dans les deux sens, de droite à gauche ou de gauche à droite, en retournant tous les caractères. Les personnages et les animaux indiquaient le sens de lecture : leur tête était toujours tournée vers le début de la ligne. De même le grec ancien pouvait-il s’écrire en « boustrophédon », c’est-à-dire suivant le parcours du bœuf qui laboure un champ, en alternant les lignes écrites de gauche à droite et de droite à gauche. Ni les scribes égyptiens ni les Grecs n’avaient besoin de briser la

symétrie de leur système visuel. En fait, leur étrange écriture bidirectionnelle n'aurait sans doute pas pu voir le jour si leur système visuel, spontanément, n'avait jugé identiques des formes symétriques telles que et . Aujourd'hui encore, certains systèmes d'écriture n'imposent guère de rupture de la symétrie. Le chinois possède bien quelques caractères comparables à nos « b » et « d », c'est-à-dire des symboles distincts mais quasi symétriques l'un de l'autre comme et ou encore et . D'autres écritures comme le tamoul, par contre, n'utilisent que d'élégants caractères cursifs tels que , , ou qui ne soulèvent aucune possibilité de confusion en miroir. Cette différence culturelle se traduit par un changement de compétence perceptive : un lecteur du tamoul confond les images en miroir et croit, par exemple, repérer la présence du triangle ◢ à l'intérieur de l'image [330].

Miroir brisé… ou miroir masqué ?

Même chez un lecteur de l'alphabet latin, qui différencie « b » de « d » et « p » de « q », la symétrie est-elle totalement brisée ? Notre système visuel, lorsqu'il voit des caractères écrits, cesse-t-il vraiment de généraliser en miroir ? Ou bien continue-t-il de le faire sans que nous en soyons conscients ? Souvenez-vous de la théorie d'Orton. Celui-ci postulait que, même chez le bon lecteur, l'hémisphère droit continue de représenter les lettres en miroir de l'hémisphère gauche. Pour Orton, apprendre à lire consiste à prêter attention à la représentation orientée dans le sens approprié et à négliger la représentation inversée, sans pour autant que celle-ci cesse d'exister. Le miroir de la lecture ne serait donc pas brisé, mais seulement masqué.

Sommes-nous donc hantés, inconsciemment, par l'image en miroir des mots que nous lisons ? Cette hypothèse n'est pas si absurde qu'il y paraît. Dans les premières étapes du traitement visuel, les lettres ne sont que des formes comme les autres. Avant que notre cerveau les ait reconnues, ou peut-être même en parallèle avec leur traitement linguistique, il se peut qu'elles soient traitées comme n'importe quelle autre image, et donc symétrisées. De fait, nous ne sommes pas totalement dépourvus de

compétences pour les mots en miroir. Moyennant un peu d'efforts, nous pouvons les déchiffrer lettre après lettre. Cela ne suggère-t-il pas, précisément, que le niveau précoce de représentation des lettres demeure réversible, contrairement au niveau plus profond de la forme visuelle des mots ?

D'autres anecdotes suggèrent que nous disposons également de programmes moteurs adaptés à l'écriture en miroir. Si vous essayez simplement d'écrire en miroir, sans doute n'y parviendrez-vous pas ; mais écrivez sur une feuille de papier placée sous le plateau d'une table, comme si vous pouviez voir le mot à travers, et vous verrez que le geste vient tout naturellement à l'envers. De même, vous pouvez écrire simultanément de la main droite en écriture normale et de la main gauche en miroir. L'écriture en miroir vient plus naturellement à la main gauche, ce qui accrédite l'idée d'une symétrie en miroir entre les deux hémisphères.

Les données les plus convaincantes, cependant, proviennent de la pathologie cérébrale. Environ un patient hémiplégique sur quarante montre, au moins de façon temporaire, une écriture en miroir. Celle-ci survient presque toujours lorsqu'un patient, initialement droitier, se trouve forcé par sa pathologie d'utiliser la main gauche. La plupart du temps, le trouble ne concerne que l'écriture, pas la lecture : le patient ne parvient pas à relire ce qu'il a écrit à l'envers. Toutefois, il existe quelques cas remarquables où lecture et écriture en miroir apparaissent simultanément et brutalement à la suite d'une lésion cérébrale.

C'est le cas de madame H. N., une Américaine de 51 ans victime d'un accident de la route[331]. Après son accident, madame H. N. souffrait de troubles modérés de l'attention, de la planification et de la mémoire liés à une réduction bilatérale du métabolisme des lobes frontaux. Elle se plaignait surtout de ne plus pouvoir ni lire ni écrire. Toutefois, un indice lui mit la puce à l'oreille : pourquoi les panneaux de la route indiquaient-ils « POTS » plutôt que « STOP » ? Progressivement, elle se rendit compte qu'il lui était facile d'écrire et de lire en miroir. Son intuition fut confirmée par des tests en laboratoire. Quelle que soit la main utilisée, lorsque madame H. N. essayait d'écrire à l'endroit, son écriture était laborieuse et truffée d'erreurs. Lorsqu'elle écrivait à l'envers, par contre, son écriture était plus fluide, quoique encore maladroite (figure 7.7).

(A) Avant l'accident
Walt Disney World
(B) Après l'accident, écriture en sens normal
(C) Après l'accident, écriture en miroir
(D) Image miroir du texte C

Figure 7.7 Certains patients atteints de lésions cérébrales se mettent à écrire et à lire en miroir. On voit ici divers exemples d'écriture de la patiente H. N., avant et après son accident (d'après Gottfried et coll., 2003).

Plus surprenant encore, sa lecture était plus précise et rapide lorsque les mots étaient présentés en miroir. Il lui fallait moins d'une seconde pour comprendre un mot lorsqu'il était présenté à l'envers, ce qui est pratiquement le temps que met une personne normale pour lire à l'envers ; mais il lui fallait plus de deux secondes et demie si le mot apparaissait à l'endroit, ce qui est quatre fois trop long. Même chose lorsque les mots étaient présentés brièvement sur un écran d'ordinateur : une présentation d'un quart de seconde lui suffisait à déterminer si une chaîne de caractères présentée en miroir formait ou non un mot, ce qui n'est vraiment pas facile. Essayez plutôt :

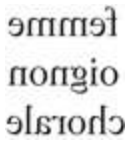
noqirlɔ
ɐgilot
ɹotɐsɔ

Curieusement, lorsque les mots étaient écrits normalement, ses performances restaient au niveau du hasard tant que la durée de présentation

n’excédait pas une demi-seconde. Ainsi, l’accident de madame H. N. semblait avoir gravement perturbé son écriture et sa lecture, tout en révélant une représentation dormante des mots en miroir dont elle n’avait aucune conscience auparavant.

Le cas de madame H. N. n’est pas isolé. Tentons de tirer quelques conclusions de la poignée de patients similaires qui ont été décrits[332]. Tout d’abord, les lésions sont souvent diffuses, mal localisées, fréquemment dues à un traumatisme crânien : il faut probablement qu’elles affectent simultanément plusieurs régions cérébrales pour que se révèle cet exceptionnel syndrome de lecture en miroir. D’ailleurs, ce serait grandement exagérer que de prétendre que l’écriture et la lecture de ces patients sont strictement normales à l’exception d’une inversion en miroir. En fait, ils écrivent maladroitement, souvent à l’aide de majuscules en bâtons, et tous présentent des difficultés de lecture qui rappellent la lecture lettre à lettre des jeunes enfants.

Le comportement de madame H. N. fournit un autre indice intéressant : même en miroir, si elle lit convenablement, elle commet beaucoup d’erreurs dans la lecture des mots irréguliers tels que :



Elle semble ne lire ces mots que par la voie d’une traduction laborieuse des graphèmes en phonèmes. Ces indices amènent donc à penser que ces patients ont perdu l’usage des circuits normaux de la lecture, notamment ceux qui reconnaissent la forme visuelle des mots et qui permettent l’accès à un lexique de formes, de sons et de sens.

J’émets donc l’hypothèse que, chez les patients qui lisent en miroir, les lésions cérébrales ont aboli les mécanismes de reconnaissance des mots écrits. Dès lors, ces patients doivent déchiffrer les mots en se servant de leur reconnaissance intacte des lettres et des graphèmes élémentaires. Dans le cerveau du lecteur expert, ce niveau le plus élémentaire de la lecture est probablement le seul à rester symétrique. C’est pourquoi les patients parviennent encore à lire en miroir – mais avec une forme de lecture hésitante, qui relève plus du déchiffrement lettre à lettre que de la lecture proprement dite.

Ce n’est pas tout : pour que la lecture et l’écriture en miroir se révèlent après une lésion chez l’adulte, il faut probablement, non seulement une lésion des circuits de la lecture, mais également un second déficit qui affecte l’orientation de l’attention dans l’espace. La plupart des patients éprouvent en effet des difficultés d’orientation spatiale qui vont bien au-delà de la lecture. Une patiente confondait sa droite et sa gauche, et dessinait en miroir les cartes de l’Australie et de la Grande-Bretagne[333]. Une autre, qui ne savait plus dans quel sens dessiner un cadran d’horloge, souffrait également de troubles de l’orientation temporelle et numérique. Elle croyait que le lendemain de vendredi était jeudi et que, âgée de 44 ans, elle en aurait 43 l’année suivante[334]. Quant à madame H. N., elle souffrait de troubles de l’attention exécutive, c’est-à-dire de difficultés à imaginer une stratégie et à s’y tenir.

Quels rôles ces troubles spatiaux et stratégiques jouent-ils dans la lecture et l’écriture en miroir ? Au cours de la lecture, les régions pariétales et frontales envoient des signaux descendants en direction des aires visuelles afin de sélectionner la région de l’espace à partir de laquelle on commence à lire. Une lésion de ces régions pourrait perturber la stratégie de lecture et en particulier sa direction. Selon cette hypothèse, peut-être est-ce parce que les patients adoptent une mauvaise stratégie de lecture et d’écriture qu’ils commencent à lire par la droite et qu’ils ne prêtent attention qu’aux représentations en miroir que concocte leur système visuel. Cette interprétation rejoindrait celle d’Orton, selon laquelle l’attention sélective est indispensable pour briser la symétrie de notre système visuel, en négligeant les représentations orientées en miroir.

Quoi qu’il en soit, les spectaculaires cas de lecture en miroir nous révèlent la face cachée de la lecture. Un lecteur symétrique sommeille peut-être en chacun de nous, mais cette compétence dormante ne se révèle au grand jour qu’à la suite de pathologies multiples dont les liens restent encore à démêler.

Symétrie, lecture et recyclage neuronal

Résumons-nous. Les circuits du système visuel de l’enfant, s’ils sont généralement aptes à se recycler afin d’apprendre à lire, possèdent une propriété indésirable pour la lecture : ils symétrisent les objets. C’est

pourquoi tous les enfants commettent, au début de leur apprentissage, des erreurs de lecture et d'écriture en miroir. Pour eux, les lettres « b » et « d » ne sont qu'un seul et même objet vu sous deux angles différents.

L'apprentissage de la lecture exige de dépasser ce stade du miroir et de « désapprendre » la généralisation par symétrie. Comment ? La distinction entre droite et gauche commence vraisemblablement dans la voie visuelle dorsale, celle qui commande les gestes dans l'espace. L'enfant apprend à tracer les contours des lettres, et associe des gestes et des orientations différents à chacune d'elles. Progressivement, cet apprentissage moteur se transfère à la voie visuelle ventrale, qui reconnaît les objets. L'enfant apprend à prêter attention à l'image des lettres dans une orientation particulière. Il apprend à les voir comme des tracés à deux dimensions plutôt que comme des volumes que l'on peut tourner dans l'espace. Se construit alors une expertise pour les groupes de lettres. Cette représentation des bigrammes, des graphèmes et des morphèmes se développe presque exclusivement dans l'hémisphère gauche, et uniquement pour les lettres présentées dans leur orientation normale.

Dès lors, la symétrie est brisée : le lecteur expert dispose d'importantes connaissances visuelles sur l'écriture normale, mais pratiquement aucune de l'écriture en miroir. Demeure simplement en lui, aux niveaux les moins élevés de la lecture, une représentation dormante de l'image en miroir des lettres. Celles-ci continuent à être traitées comme n'importe quelle autre forme visuelle, et donc à être symétrisées – mais cette image en miroir n'est plus exploitée par la lecture normale, qui a appris à s'en détacher.

Qu'il faille, à un enfant d'intelligence normale, plusieurs mois pour désapprendre la généralisation en miroir apporte un argument de poids à l'appui de ma théorie du recyclage neuronal. Si le cerveau n'était qu'une ardoise vierge, dépourvu de structure et capable d'absorber n'importe quel environnement culturel, pourquoi adopterait-il des représentations en miroir tellement inadaptées à la lecture ? Le terme de recyclage souligne que le tissu neuronal qui permet l'apprentissage culturel possède des propriétés structurelles, dont il a hérité de son histoire évolutive avant de se reconvertir. Chaque région corticale possède ses atouts et ses faiblesses, qui ne peuvent être que partiellement modifiés par l'apprentissage culturel. La culture humaine doit composer avec ces biais biologiques et trouver le moyen de les adapter à leur nouvel usage.

Un cas surprenant de dyslexie en miroir

Comment cette vision de la lecture éclaire-t-elle les troubles de l'apprentissage de la lecture chez l'enfant ? Nous avons vu au chapitre 6 que, chez la majorité des dyslexiques, les difficultés de lecture proviennent d'un déficit phonologique. Cependant, j'ai également mentionné l'existence probable d'une seconde catégorie, plus petite, de dyslexies d'origine visuelle. Leur problème viendrait-il, en partie, du désapprentissage de la symétrie en miroir ?

Dans l'imaginaire du grand public, un dyslexique est quelqu'un qui confond sa droite et sa gauche, et se trompe dans l'orientation des lettres. Ce n'est pas totalement un mythe : l'orientation des lettres pose des difficultés particulières à bon nombre d'enfants dyslexiques, qui ont tendance à confondre « p » et « q », ou « b » et « d »[335]. Toutefois, même chez les dyslexiques, ces difficultés ne sont généralement que transitoires : elles surviennent entre 7 et 10 ans, lorsque l'enfant apprend la forme des lettres, et disparaissent ensuite. Les enfants dyslexiques ne paraissent pas plus doués que les autres pour lire en miroir. Chez la majorité des dyslexiques, les difficultés visuelles ne semblent donc pas jouer un rôle primordial[336]. Celles qui sont effectivement attestées pourraient bien n'être que la conséquence des troubles de la phonologie : si je n'entends pas bien la différence entre les phonèmes *b* et *d*, qui sont très proches, sans doute me faudra-t-il plus de temps pour apprendre que les formes visuelles « b » et « d » réfèrent à des lettres complètement différentes. Comme par un fait exprès, les lettres symétriques ont également des prononciations qui se ressemblent. Il n'est donc pas étonnant que cette conjonction de deux difficultés pose un problème aux enfants qui souffrent de troubles phonologiques.

Cependant, chez quelques enfants, la confusion entre gauche et droite semble être vraiment la cause primaire de la dyslexie. Il en existe au moins un exemple frappant, le cas d'une jeune femme étudiée en grand détail par le neuropsychologue Michael McCloskey et ses collègues[337]. Le déficit de mademoiselle A. H. n'a été reconnu que très tardivement, à l'âge de 20 ans. C'était alors une étudiante brillante, engagée dans des études de psychologie à l'Université Johns Hopkins de Baltimore, où enseignait le professeur Michael McCloskey. À la fin d'un cours sur les troubles du

développement, elle vint le trouver pour lui signaler qu'en dépit de ses bons résultats, elle avait souffert, durant toute sa scolarité, de difficultés sévères en lecture et en calcul. McCloskey décida de la soumettre à quelques tests. Bien lui en prit : la jeune femme s'avéra souffrir d'une variété très étonnante de dyslexie, liée à une désorganisation sélective des informations spatiales à tous les niveaux de la lecture.

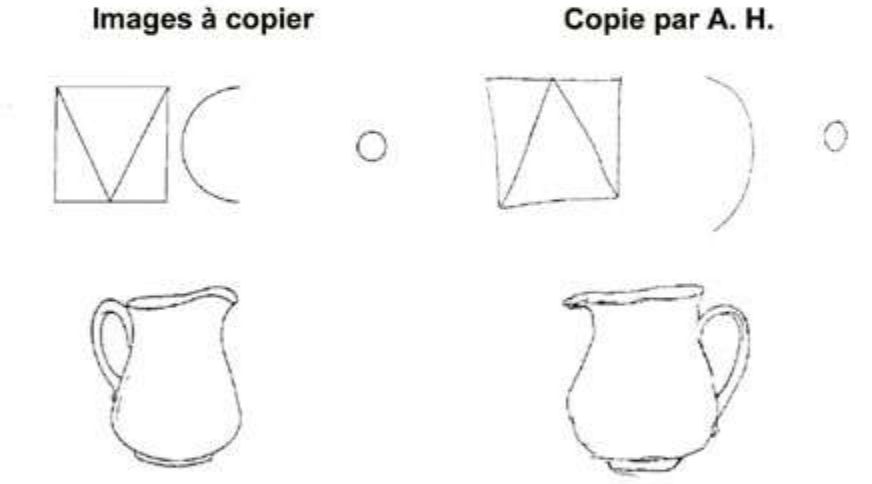
Lorsqu'elle lisait une lettre isolée, A. H. faisait presque exclusivement des erreurs spatiales : elle confondait les « p » et les « q », les « m » et les « w ». Par contre, elle ne se trompait presque jamais sur les lettres dont l'identité ne dépend pas de l'orientation, comme « g » ou « k ». Lorsqu'elle lisait des mots, A. H. se trompait à nouveau sur l'orientation des lettres, mais elle inversait également leur position à l'intérieur des mots (figure 7.8). C'est ainsi que *snail* (« escargot ») devenait *nails* (« ongles »). Enfin, lorsqu'elle lisait des phrases, elle inversait fréquemment des mots, du moins lorsque leur ordre n'était pas fortement contraint par le contexte.

Mademoiselle A. H. semblait vivre dans un monde visuel où les relations spatiales ne cessaient de fluctuer. Tous les mots devenaient ambigus : là où nous ne percevons qu'une série limpide de lettres, disons « dons », elle détectait une multiplicité de possibilités (« dons », « bons », « snob »…), parmi lesquelles il lui fallait choisir en fonction du contexte de la phrase. Pour démontrer l'étendue de sa confusion, Michael McCloskey tenta une expérience singulière. Il lui fit lire des phrases dont l'orientation et l'ordre des lettres et des mots avaient été bouleversés, par exemple : *The stock market is storngly affected dy dercebtions the the of pulbic* (« La pourse est foretment influencée qar l'ibée s'en que fait le pulbic »). Non seulement A. H. les lut sans hésitation, en corrigeant spontanément les erreurs – mais elle affirma que 60 % des phrases étaient strictement normales ! Elle avait toujours vécu avec son déficit et n'avait donc aucune conscience de l'instabilité de sa représentation spatiale des lettres et des mots.

Le déficit de A. H. ne se bornait pas à la lecture. Elle s'avéra également incapable de recopier des dessins dans leur orientation correcte. Lorsqu'elle copiait un dessin, il y avait près d'une chance sur deux que le résultat soit inversé en miroir (figure 7.8). On retrouva, dans son dossier scolaire, des copies de peintures qu'elle avait faites dans son enfance, à l'occasion d'une visite au musée : les objets et les personnages y étaient déjà inversés. Elle

avait essayé de copier les chapeaux du tableau de Renoir *Le Déjeuner des canotiers*, mais, sur son dessin, tous les couvre-chefs des personnages de gauche étaient échangés avec ceux de droite et *vice versa*.

Mot présenté	Réponse donnée par A. H.
dog	bog
bone	done
pig	dig
star	tars
rib	rip
sun	nuns
skirt	skit
dust	dusk



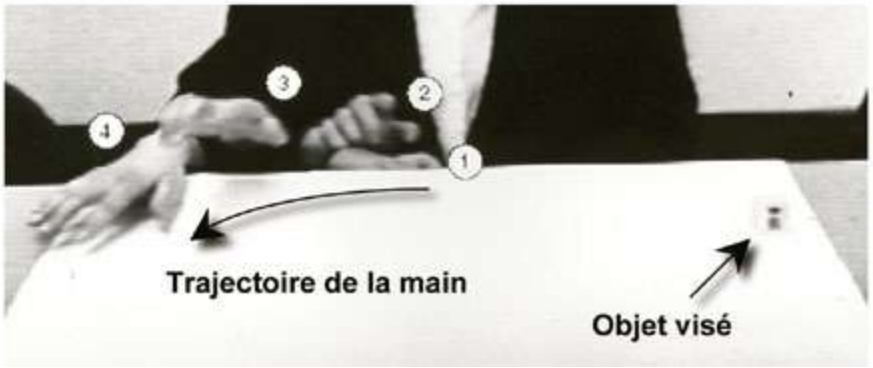


Figure 7.8 La dyslexie semble parfois due à un excès de symétrie des fonctions visuelles. On voit ici quelques manifestations des troubles spatiaux de mademoiselle A. H., une jeune femme dyslexique. Ses erreurs de lecture (en haut) concernent principalement les lettres réversibles b, d, p, et q, mais affectent également l'ordre et plus rarement l'identité de certaines lettres. A. H. ne parvient pas à copier un dessin sans en inverser fréquemment l'orientation, particulièrement selon l'axe gauche-droite (image du milieu). Une photographie à expositions multiples montre la main d'A. H. se diriger vers une position exactement symétrique de l'objet qu'elle vise (en bas) (d'après McCloskey et coll., 1995 et 2000).

Plus étonnant encore, mademoiselle A. H. inversait parfois les gestes les plus banals de la vie quotidienne. Une épreuve lui demandait de fermer les yeux tandis qu'on plaçait devant elle un cube en bois. Elle devait alors ouvrir les yeux et attraper le cube aussi vite que possible. Une caméra vidéo, qui filmait toute la scène, saisit ce phénomène étonnant : les deux tiers du temps, sa main se dirigeait d'abord dans la direction opposée à l'objet (figure 7.8) ! C'est seulement dans un second temps qu'elle en corrigeait la trajectoire. Dans ce test, A. H. inversait si souvent la droite et la gauche que ses performances étaient pires que celles d'une personne qui aurait répondu au hasard. Tous les autres aspects de son geste étaient appropriés, tant en distance qu'en excentricité ou en vitesse. Mademoiselle A. H. ne souffrait donc que d'un déficit très sélectif de l'orientation spatiale. Son monde visuel semblait se retourner sans cesse comme un gant, comme si un mauvais génie lui imposait d'habiter dans un labyrinthe de miroirs.

Au cours de leurs explorations, Michael McCloskey et ses collègues découvrirent fortuitement un moyen d'aider mademoiselle A. H. Ils s'aperçurent que son déficit dépendait principalement des voies les plus lentes de la vision, celles qui nous permettent d'analyser des scènes statiques. Lorsque l'objet se déplaçait, clignotait ou était présenté pendant moins d'un dixième de seconde, A. H. obtenait de bien meilleurs résultats. Ainsi, il suffisait de faire clignoter les lettres, les mots et les phrases à une vitesse de dix cycles par seconde pour que son taux d'erreurs descende pratiquement au niveau de la normale. Nous ignorons tout des raisons de ce phénomène, qui entre en conflit direct avec la théorie proéminente selon laquelle la dyslexie résulte d'une atteinte de la voie magnocellulaire de traitement visuel rapide[338]. Mais cette manipulation était si efficace que A. H. prit l'habitude de lire sous la lumière d'un stroboscope !

Le cas de mademoiselle A. H. fait figure d'anomalie dans la littérature scientifique sur la dyslexie. À ce titre, il soulève plus de questions qu'il n'en résout. Combien d'enfants étiquetés comme dyslexiques souffrent en

fait, comme A. H., d'un déficit primaire de l'organisation spatiale de la vision ? Combien pourraient bénéficier du même traitement stroboscopique ? Et d'où provient cette mystérieuse inversion en miroir du monde visuel ? Mademoiselle A. H. souffre-t-elle d'une lésion sélective de la voie visuelle dorsale, qui permet de localiser les objets dans l'espace et de distinguer la droite de la gauche ? Ou bien, au contraire, l'origine du déficit doit-elle être recherchée dans la voie ventrale, qui souffrirait peut-être d'un excès de connexions « symétrisantes » au niveau du corps calleux ? On peut également évoquer un trouble de l'apprentissage : le mécanisme d'élimination synaptique, qui permet de désapprendre la symétrie lorsque nous apprenons à lire, serait déficient, laissant A. H. dans l'état d'un jeune enfant incapable de percevoir la différence entre un mot et son image miroir. À l'avenir, l'imagerie cérébrale pourrait permettre d'apporter des éléments de réponse à ces questions ouvertes.

En définitive, le cas fascinant de mademoiselle A. H. nous rappelle, comme en négatif, l'importance que revêt l'organisation spatiale des lettres dans le développement normal de la lecture. Apprendre à lire, ce n'est pas seulement associer des lettres à des sons ; c'est également organiser la perception de ces lettres dans l'espace, dans le bon ordre et avec l'orientation adéquate. Dans le cerveau du jeune lecteur, un dialogue doit s'instaurer entre la voie visuelle ventrale, qui reconnaît l'identité des lettres et des mots, et la voie dorsale, qui code leur position dans l'espace et programme les mouvements des yeux et de l'attention. Que l'un ou l'autre de ces protagonistes trébuche, et c'est toute la lecture qui chancelle.

Peut-être faut-il voir dans ce rôle essentiel de la voie visuo-spatiale dorsale une justification des succès qu'obtiennent certaines méthodes d'enseignement de la lecture qui reposent au premier chef sur l'activité motrice de l'enfant. Dans les écoles maternelles inspirées par la psychologue Maria Montessori, l'une des activités qui préparent l'enfant à la lecture consiste à tracer du doigt le contour de grandes lettres en papier de verre. Ce tracé se fait toujours de la gauche vers la droite, et en respectant la manière dont laquelle ces lettres s'écrivent. Ainsi cette activité met-elle en relation le geste, le toucher, la vision et le sens de l'espace. En imposant à la vision une exploration spatiale et motrice asymétrique, elle ne peut que faciliter la rupture de symétrie de la voie visuelle ventrale. Récemment, Édouard Gentaz et ses collègues ont montré que, chez l'enfant

normal, cette méthode multisensorielle était plus efficace qu'un simple entraînement phonologique et visuel[339].

Voilà qui ouvre une authentique piste de recherches pour le futur. Pourrait-on montrer, à l'aide de l'imagerie cérébrale, que la méthode tactile facilite les connexions entre la voie dorsale et la voie ventrale ? L'exploration spatiale des lettres pourrait-elle également aider les enfants qui souffrent d'une dyslexie d'origine visuelle ? Une rééducation par le toucher permettrait-elle à mademoiselle A. H. de récupérer des capacités de lecture normales ? Tel est bien le double enjeu de ces recherches : mieux comprendre les difficultés que rencontre le cerveau humain lorsqu'il se reconvertit à la lecture ; mais également sélectionner des méthodes d'enseignement et de rééducation optimisées, plus efficaces parce que mieux adaptées au cerveau de l'enfant.

Chapitre 8
Vers une culture de neurones

La lecture ouvre une fenêtre sur les interactions entre culture et cerveau. Le modèle du recyclage neuronal peut-il être étendu à des inventions culturelles autres que la lecture ? Les mathématiques, les arts ou la religion pourront peut-être, un jour, être analysés comme autant de dispositifs culturels qui se propagent parce qu'ils entrent en résonance avec nos cerveaux de primates. Mais pourquoi l'espèce humaine est-elle la seule qui s'invente une culture et songe ainsi à conférer à ses circuits cérébraux de nouveaux usages ? J'avance l'hypothèse que le cerveau humain dispose d'un nouvel « espace de travail conscient », un vaste système de connexions corticales qui brise la modularité cérébrale et permet la recombinaison flexible des circuits existants pour créer de nouveaux outils mentaux.

« Quand on proclama que la Bibliothèque comprenait tous les livres, la première réaction fut un bonheur extravagant. Tous les hommes se sentirent maîtres d'un essor intact et secret. »

Jorge Luis BORGES,
La Bibliothèque de Babel

« Si Dieu existait, il serait une bibliothèque. »

Umberto ECO

Parvenus au terme de notre exploration du cerveau du lecteur, nous mesurons mieux par quelle heureuse fortune de l'évolution notre cerveau de primate parvient à lire. Si livres et bibliothèques ont pu jouer un rôle si déterminant dans l'évolution culturelle de notre espèce, c'est bien parce que l'invention de l'écriture a conduit l'humanité à découvrir un moyen inédit de convertir une partie de son cortex visuel en un instrument linguistique. Que nous puissions ainsi modifier nos circuits cérébraux afin d'« écouter les morts avec les yeux » relève de la plus pure opportunité. Nous avons simplement la chance de disposer de régions corticales qui ont le pouvoir d'apprendre à relier quelques graffitis sur une page blanche aux sens et aux sons du langage.

Cependant, nous avons également découvert que ces systèmes neuronaux ne sont qu'imparfaitement adaptés à la lecture. Leur piètre résolution, la lenteur de leur apprentissage et leur inadéquate généralisation par symétrie constituent autant de stigmates de leur évolution, qui ne pouvait pas prévoir qu'ils seraient un jour recyclés pour la reconnaissance de mots. Je n'en ai que plus d'admiration pour les générations successives de scribes qui, depuis l'antique Sumer, ont su tirer parti de ces circuits, par tâtonnements successifs, pour concevoir des systèmes d'écriture toujours

plus raffinés et efficaces. Grâce à eux, les pattes de mouche qui tapissent cette page vous parlent.

La résolution du paradoxe de la lecture

Au début de ce livre, je soulevais une question étrange que j'appelais le « paradoxe de la lecture ». Comment se pouvait-il que, sans évolution génétique majeure, notre cerveau se soit adapté à la lecture ? Par quel biais le primate humain s'était-il transformé en rat de bibliothèque ? Comment une invention culturelle aussi récente que la lecture pouvait-elle trouver racine dans des circuits cérébraux qui n'avaient jamais, au cours de leurs millions d'années d'évolution, été confrontés à des mots écrits ?

Nous savons maintenant que le paradoxe s'évanouit si l'on retourne le problème. Le cerveau humain n'a jamais évolué pour la lecture. Aucun Grand Architecte n'a câblé notre cerveau en vue de faire de nous des lecteurs de son Livre. C'est au contraire la lecture elle-même qui a évolué afin de présenter une forme adaptée à nos circuits. En quelques milliers d'années d'essais et d'erreurs, tous les systèmes d'écriture ont convergé vers des solutions similaires. Tous font appel à un jeu de caractères simple, que notre région occipito-temporale gauche n'éprouve pas de difficulté insurmontable à apprendre et qu'elle parvient à connecter aux aires du langage. La conception des écritures est proche d'un optimum qui leur permet, en quelques années, d'envahir les circuits neuronaux de l'apprenti lecteur. J'ai introduit le concept de « recyclage neuronal » pour décrire cette invasion, partielle ou totale, par un objet culturel nouveau, de territoires corticaux initialement dévolus à une fonction différente.

Je crois à l'importance des détails et c'est pourquoi le lecteur me pardonnera, j'espère, d'avoir décrit par le menu comment fonctionne la lecture. Il m'importait d'illustrer très concrètement deux aspects essentiels du fonctionnement cérébral.

Premièrement, l'apprentissage culturel ne repose pas sur des mécanismes généraux d'apprentissage, mais sur des circuits neuronaux préétablis dont la fonction est étroitement définie. Dans le cas de la lecture, ces circuits commencent à être connus avec une grande précision : il s'agit des circuits de reconnaissance visuelle invariante et de leurs connexions avec les aires du langage parlé. Leur riche structure et leur capacité

d’apprentissage, communes à tous les primates, délimitent une frange restreinte de systèmes d’écriture admissibles.

Deuxièmement, et en conséquence, les cultures humaines ne sauraient être ces immenses espaces d’infinie diversité et d’arbitraire invention que nous décrivent certains chercheurs en sciences humaines. Les structures cérébrales restreignent les constructions culturelles. Notre capacité d’invention n’est pas infinie, elle repose sur un jeu de construction neuronal qui nous est imposé. Si elle présente l’apparence d’une très grande diversité, c’est que celle-ci émerge de la combinatoire exponentielle d’un répertoire restreint de formes culturelles fondamentales.

Dans le cas de la lecture, ces invariants culturels ont une réalité tangible. Au chapitre 4, nous les avons observés très directement dans l’inventaire des formes visuelles de Marc Changizi, dont la statistique se vérifie dans toutes les écritures du monde. J’ai également décrit comment toutes les écritures, depuis le chinois jusqu’à l’alphabet, obéissent à un principe morpho-phonologique – elles représentent simultanément les racines et les sonorités des mots. Ainsi, de nombreux traits universels pointent derrière l’apparente diversité des écritures.

L’universalité des formes culturelles

Dans ce dernier chapitre, je voudrais défendre l’idée que la lecture ne constitue qu’un exemple, particulièrement bien étayé, d’invention culturelle contrainte par notre architecture neuronale. Si le modèle du recyclage neuronal possède une quelconque généralité, on devrait pouvoir rattacher chacune de nos activités culturelles à leurs mécanismes cérébraux et montrer qu’en chaque instance, les contraintes du recyclage imposent des limites sévères à l’espace des possibles. Même si cette possibilité paraît lointaine, il se pourrait que nous puissions établir un jour une liste des composantes les plus essentielles des cultures humaines (l’organisation familiale et sociale, la tradition religieuse, le style musical, les formes d’expression artistique, etc.), et en comprendre l’origine et la nécessité par l’analyse des grands domaines de compétence de notre cerveau.

J’appelle de mes vœux cette « culture de neurones », dont Jean-Pierre Changeux établit les jalons depuis plus de trente ans[340], et qui rendrait compte, sans réductionnisme excessif, de l’extraordinaire diversité,

cependant non infinie, des dimensions de la culture humaine. Dans une perspective « neuro-anthropologique », chacun de leurs traits devrait, *in fine*, être mis en liaison avec autant des circuits neuronaux délimités dont la combinatoire expliquerait les formes multiples que prennent les représentations culturelles à travers notre planète. Bien entendu, il serait naïf d'espérer la réduction directe d'une invention culturelle, aussi simple soit-elle, à des facteurs biologiques élémentaires tels qu'un gène, une molécule ou une catégorie de neurones. Comme j'ai tenté de l'illustrer dans le cas de la lecture, comprendre les mécanismes cérébraux des inventions culturelles exigera de jeter des ponts entre des disciplines très diverses, depuis les réseaux de neurones jusqu'aux lois de la psychologie et de la sociologie.

Bien que cette perspective paraisse audacieuse, je trouve un certain soutien dans la lecture d'arguments très semblables chez certains de mes collègues. Le linguiste Noam Chomsky, par exemple, souligne les limites du relativisme culturel :

> « Selon un argument communément admis, ce serait la richesse et la spécificité des instincts des animaux qui expliqueraient leurs remarquables exploits dans certains domaines et leur manque de compétence dans d'autres ; tandis que l'espèce humaine, dépourvue de toute structure instinctive articulée, serait libre de penser, de parler, de découvrir et de comprendre sans bornes. Tant la logique du problème que ce que nous commençons à comprendre suggère que cela n'est pas la bonne manière de caractériser la position de notre espèce dans le monde animal[341]. »

Dès 1974, l'anthropologue français Dan Sperber soulignait que « l'image qui se dégage de la littérature ethnographique accumulée n'est pas du tout celle d'une variabilité indéfinie, mais bien plutôt celle de variations extrêmement élaborées à l'intérieur d'un éventail qui semble arbitrairement restreint[342] ».

L'hypothèse selon laquelle la diversité culturelle masque une combinatoire restreinte de structures mentales universelles, défendue au premier chef par Claude Lévi-Strauss, titulaire de la chaire d'anthropologie structurale du Collège de France, a trouvé confirmation dans les travaux de l'anthropologue cognitif Donald Brown. Dans son ouvrage *Human Universals*[343], il dresse une longue liste de près de 400 traits partagés par l'ensemble des cultures de la planète, depuis les termes de couleurs, de nombres ou de personnes jusqu'à la territorialité, la garde des enfants, la création musicale, le jeu, l'existence d'un système de lois et bien d'autres encore.

Quelles sont les origines de ce répertoire de traits culturels fondamentaux ? Selon Dan Sperber[344], ils résultent de la structure modulaire de l'esprit humain. Reprenant à son compte l'hypothèse de Jerry Fodor[345], Sperber envisage l'esprit comme une collection de « modules spécialisés » qui ont évolué pour répondre à un domaine précis de compétence. Pour Sperber, chaque module possède son domaine propre, c'est-à-dire l'ensemble des conditions passées qui ont motivé son évolution, mais il possède également un « domaine effectif », généralement plus étendu, qui comprend toutes les conditions susceptibles de déclencher son activation. Les cultures humaines inventent des artefacts qui entrent dans l'enveloppe de ce domaine effectif.

Considérons l'exemple de la reconnaissance des visages. C'est une compétence dont nous sommes tous pourvus dès la plus tendre enfance, et à laquelle sont associés des circuits spécialisés de la voie visuelle ventrale, que certains qualifient de « module des visages[346] ». Par hypothèse, le « domaine propre » de ce module est constitué des visages de nos congénères. Mais notre dispositif de reconnaissance des visages se déclenche également dans beaucoup d'autres conditions que la rencontre d'un visage en chair et en os : lorsque nous reconnaissons une statue ou une photographie ; lorsque nous croyons identifier la face du Christ dans des taches de neige ; lorsque certains astronomes croient voir la gigantesque sculpture d'un visage humain sur la planète Mars (en réalité, l'ombre d'une montagne) ; ou, plus banalement, lorsque nous échangeons des *smileys* et autres *emoticons* (☺) popularisés par le réseau Internet. Selon Sperber, tous ces stimuli, naturels ou artificiels, font partie du domaine effectif de notre hypothétique module de reconnaissance des visages.

Pour Sperber, ce décalage entre le domaine effectif et le domaine propre de nos modules engendre un espace de créativité que toutes les cultures humaines exploitent. Afin d'attirer l'attention de leurs congénères, les humains inventent des objets culturels dont l'unique but est d'exciter, d'une manière inattendue, les modules de leur cerveau. Ainsi une sorte de jeu culturel, à la marge de notre module de reconnaissance des visages, expliquerait la propension universelle des cultures humaines à créer des portraits, des statues, des caricatures, des masques, du maquillage ou des tatouages. Souvent, ces artefacts culturels exagèrent les traits du visage jusqu'à constituer ce que les éthologues appellent des « superstimuli » qui

suractivent le module plus encore qu'un visage normal. On comprend alors mieux l'efficacité de leur propagation culturelle.

Recyclage neuronal et processeurs cérébraux

Une parenté évidente et même une certaine complémentarité relient l'idée sperbérienne d'un décalage entre domaines et mon hypothèse du recyclage neuronal. Les deux modèles envisagent comment l'objet culturel, bien qu'il ne pouvait avoir été anticipé par l'évolution, finit par trouver sa place au sein de notre architecture cérébrale, dans la mesure où il fait partie du répertoire étendu de formes mentales accessibles, à la marge des conditions normales de fonctionnement de nos circuits cérébraux.

Toutefois, le mécanisme auquel Dan Sperber attribue l'origine des principaux universaux culturels n'accorde peut-être pas toute la place qu'il faudrait à l'apprentissage et à la plasticité cérébrale. Même si Sperber décrit les modules comme des « instincts d'apprendre », des machines à acquérir des connaissances, il postule également que leur domaine d'apprentissage est restreint. De cette rigidité même dépend l'explication des caractères universels des cultures humaines : par hypothèse, tous les hommes et toutes les femmes disposent de la même liste de modules, fixée une fois pour toutes au cours de l'évolution du cerveau humain.

La vision de la culture qui en émerge pourrait sembler réductrice à certains : les cultures humaines se caractériseraient simplement par la liste, plus ou moins diversifiée, des astuces qu'elles ont découvertes pour stimuler un ou plusieurs modules cérébraux préétablis. Or l'exemple de la lecture suggère que l'invention culturelle va bien au-delà. L'invention de la lecture n'a pas seulement consisté à découvrir une manière originale de stimuler les aires de reconnaissance visuelle des objets. En inventant la lecture, nos sociétés ont créé les conditions d'une authentique « révolution culturelle » en concevant une extension radicale des capacités cognitives humaines. L'exposition, dès le plus jeune âge, du cerveau de l'enfant à la lecture, au moment où il est le plus aisément modifiable, facilite ce changement profond qui va bien au-delà de la simple redirection des entrées d'un module cérébral.

Je n'aime pas beaucoup, d'ailleurs, ce terme de « module » qui enferme les fonctions cérébrales dans des cases figées que l'on imagine bien nettes

et qui paveraient la surface du cortex. La réalité corticale est bien plus flexible. Jean-Pierre Changeux a souligné l'explosion du nombre de synapses qui survient dans les premières années de vie et ouvre un immense espace de redondance et de plasticité. Les circuits anatomiques, s'ils sont organisés dès la naissance, ne sont pas spécifiés dans leurs moindres détails. Sont-ils vraiment dédiés à tel ou tel domaine ou seulement biaisés pour en faciliter l'apprentissage ? Toujours est-il que, pendant cette période d'exubérante diversité synaptique de la petite enfance, le foisonnement de connexions est tel qu'un circuit qui a évolué sous la pression sélective d'une contrainte cognitive peut se reconvertir pour une tout autre fonction.

Il me semble donc que le mécanisme du recyclage neuronal, mis en évidence dans le domaine de la lecture, enrichit et complète celui de Sperber. Les contours des processeurs cérébraux, loin de former des frontières rigides, disposent d'une frange de plasticité. Leur fonction peut changer, particulièrement lorsque les cultures parviennent à jouer avec l'exposition précoce du cerveau de l'enfant à des objets culturels. L'espace de diversité culturelle qui s'ouvre ainsi est plus vaste que ne le laisserait penser l'hypothèse d'une liste fixe de modules.

J'ajoute que, si le jeu culturel avec le visage, le tatouage ou le masque s'impose comme une évidence aux peuples du monde entier, d'autres inventions culturelles comme la lecture sont beaucoup plus difficiles d'accès. Même si toutes appartiennent, par définition, à l'enveloppe des représentations que la variabilité de nos circuits cérébraux permet d'apprendre, certains objets de pensée se distinguent par une complexité supérieure qui nécessite un enseignement précoce, et traduit vraisemblablement l'intensité des modifications synaptiques qu'ils requièrent. Je pense à la lecture, bien entendu, mais aussi aux mathématiques ou à la musique, qui sont des inventions récentes et dont la profondeur varie grandement d'une culture à l'autre. Les niches neuronales de nos objets culturels ne paraissent pas toutes également accessibles : certaines ne s'ouvrent qu'après le franchissement d'étapes intermédiaires dans l'acculturation de nos réseaux cérébraux.

Vers une liste d'invariants culturels

D’ambitieux programmes de recherche tentent aujourd’hui d’expliquer les traits les plus saillants des cultures humaines (musique, religion, arts, mathématiques, sciences…) en recherchant à quels modules cérébraux ceux-ci font appel, et comment ils ont évolué sur le plan phylogénétique et épigénétique. Un rapide panorama fait apparaître plusieurs domaines dans lesquels ces recherches ont conduit à quelques avancées significatives.

Sciences naturelles

La classification et l’étude des plantes et des animaux sont des préoccupations communes à toutes les cultures[347]. Scott Atran et Dan Sperber mettent en relation ce goût pour la taxonomie avec un hypothétique module de « biologie populaire » (*folk biology*) spécialisé dans la connaissance des êtres vivants. Celui-ci jouerait un rôle essentiel dans l’alimentation, la santé et l’intégration d’une espèce à son milieu écologique. La psychologie du développement, l’imagerie cérébrale et la neuropsychologie commencent effectivement à mettre en évidence une spécialisation cérébrale pour la catégorie des êtres vivants, qui peut faire l’objet de lésions spécifiques et semble s’installer très précocement chez le jeune enfant[348].

Mathématiques

Mon laboratoire, avec d’autres, étudie comment les plus simples des objets mathématiques s’ancrent dans le cerveau[349]. Tant dans le domaine de l’arithmétique que dans celui de la géométrie, toutes les cultures partagent un socle minimal de concepts abstraits que l’on retrouve précocement chez l’enfant, en l’absence d’éducation et même de mots pour les exprimer. Prenons l’exemple du concept de nombre. Même un jeune enfant amazonien, dont la langue munduruku ne possède pas de mots pour les nombres au-delà de 5, comprend la différence entre deux ensembles de 20 et 40 points, sait les ordonner et même les combiner en additions et soustractions approximatives[350]. Ces compétences pour l’arithmétique élémentaire se rapportent aux lobes pariétaux des deux hémisphères, qui abritent une région sensible au nombre d’objets présents sur la rétine. On sait aujourd’hui qu’une région homologue existe chez le singe macaque, où sont retrouvés des neurones spécialisés pour le nombre[351].

Ainsi cette recherche donne-t-elle corps à l'idée d'une universalité des mathématiques, dont les fondements ultimes se trouveraient dans les représentations mentales structurées que nous héritons de notre évolution – sens du nombre, de l'espace, du temps, etc. – et que nous apprenons à recombiner et à étiqueter par le biais des symboles écrits et parlés.

Création artistique

Pourquoi toutes les cultures produisent-elles des œuvres d'art, une activité dispendieuse et dont l'utilité pratique semble négligeable ? Dans ses livres et ses cours de « neuro-esthétique » au Collège de France (2003-2005), Jean-Pierre Changeux a proposé une interprétation neuronale de l'art, en s'intéressant particulièrement à la peinture et à la musique[352]. Pour lui, la diversité des représentations mentales qu'abrite notre cerveau, « synthèse d'évolutions multiples », expliquerait les multiples résonances émotionnelles qu'évoque l'œuvre d'art. Celle-ci est éclatée dans de multiples aires cérébrales, donc chacune traite un attribut de la composition : couleurs, textures, visages, mains, expressions des personnages… L'œuvre de qualité est originale lorsqu'elle stimule de multiples processeurs cérébraux d'une façon nouvelle et harmonieuse.

Des idées semblables se retrouvent sous la plume du neurologue américain V. S. Ramachandran, pour qui « l'objectif de l'art n'est pas de dépeindre ou de représenter la réalité […] mais de la rehausser, de la transcender ou même de la déformer […], l'amplifier pour qu'elle active plus fortement les mêmes mécanismes neuraux qui sont sollicités par l'objet original[353] ». Pour le neurophysiologiste britannique Semir Zeki, « les artistes sont, en un sens, des neurologues qui étudient le cerveau avec des techniques qui leur sont propres[354] ». Selon lui, le fauvisme explore les frontières de l'aire de la couleur (V4), l'art cinétique celle du mouvement (V5)… mais l'artiste doué cache dans son œuvre une multiplicité d'interprétations qui renouvelle sans cesse le plaisir du spectateur.

Jean-Pierre Changeux va plus loin. Pour lui, le chef-d'œuvre ne doit pas seulement contacter de multiples représentations mentales, mais également en proposer une synthèse harmonieuse. Il ne suffit pas de « superstimuler » le spectateur par des couleurs criardes, du mouvement hypnotisant ou des images choquantes pour réaliser une œuvre d'art éternelle, même si cette

description semble correspondre à certaines tendances de l'art contemporain ! Les bases neurales de la « cohérence des parties au tout », ce *consensus partium* que Changeux place au cœur de la création artistique, commencent à être étudiées dans le domaine musical[355]. Les harmonies d'octave et de quinte constituent des universaux culturels déjà présents chez le nourrisson. Ils s'expliqueraient, au niveau de l'aire auditive primaire, par la cohérence d'activité neuronale de haute amplitude qu'évoquent les accords consonants, tandis que les accords dissonants produisent de désagréables battements de phase. Par extension, l'harmonie d'une peinture se refléterait-elle dans la synchronie des aires cérébrales distribuées qu'elle sollicite ? Nous n'avons pas encore la réponse : la neuro-esthétique demeure, à l'heure actuelle, un champ balbutiant et controversé des neurosciences.

Religion

Qu'en est-il de la propension universelle des sociétés humaines à se donner une religion ? Le fait religieux puise-t-il également ses origines dans le cerveau et l'évolution ? Trois livres récents[356] avancent des explications cognitives et même « neurothéologiques » de l'universalité de la religion et de sa stabilité millénaire.

Daniel Dennett popularise l'explication « mémétique » de Richard Dawkins. Notre capacité de transmission culturelle, par le langage et l'imitation, entraînerait l'apparition inévitable de représentations mentales parasites, des « mêmes » qui ne sont pas nécessairement avantageux pour leur hôte, mais dont la caractéristique principale est de faciliter leur propre propagation. Les religions ne seraient rien d'autre que des assemblages autoreproducteurs de représentations mentales, dont le contenu même stipule aux fidèles qu'il serait sacrilège de ne pas les propager sans discussion et avec haute… fidélité.

Reprenant cette notion d'une « épidémie mentale », Pascal Boyer en précise les mécanismes cognitifs : les religions parasiteraient nos modules cognitifs d'intelligence sociale, de sens moral et d'inférence causale (ceux qui nous font inférer l'intervention d'un agent conscient lorsque le comportement des objets nous paraît autonome ou dirigé vers un but).

Scott Atran, enfin, tente de comprendre pourquoi le surnaturel présente un attrait singulier pour l'espèce humaine. Pour lui, les créatures surnaturelles – ancêtres invisibles, arbres pensants, objets maléfiques, sites enchantés, etc. – présentent la particularité d'entrer dans le champ de nos catégories mentales naturelles (congénères, animaux, objets, lieux) tout en violant une de leurs règles élémentaires. C'est ce décalage qui expliquerait que nous nous plaisions tant à propager ces objets de pensée purement imaginaires. Ils constitueraient, pour notre cerveau, des superstimuli particulièrement efficaces : tels des Janus, leur face normale leur permettrait d'être bien introduits au sein d'un de nos modules mentaux, tandis que leur face insolite (invisibilité, pouvoirs magiques) attirerait l'attention et les rendrait plus mémorables. De même que l'art cinétique, selon Zeki, nous fascine parce qu'il stimule d'une façon inédite nos aires cérébrales du mouvement, le surnaturel produit un effet semblable de « miroir aux alouettes » sur nos représentations cérébrales plus abstraites des lieux, des objets, des animaux ou des hommes.

Toutes ces explications évolutionnistes sonnent souvent juste et présentent l'intérêt de rapporter l'art et la religion à des phénomènes cognitifs normaux, que l'on peut désormais étudier par les méthodes usuelles de la psychologie et de l'anthropologie cognitive. Je ne peux, toutefois, m'empêcher de leur trouver un arrière-goût des *Histoires comme ça* de Rudyard Kipling, qui nous expliquent avec fantaisie pourquoi l'éléphant a une trompe et comment le tigre a attrapé ses rayures. Comme les histoires de Kipling, ces explications font appel à des mécanismes spéculatifs qui demeurent, pour l'instant, invérifiés. La neuro-esthétique et la neurothéologie ne ressemblent encore trop souvent qu'à des pétitions de principe. Par contraste, c'est tout l'intérêt de la lecture que de se prêter à une dissection rigoureuse de ses mécanismes neuronaux, au sein de circuits identifiés et reproductibles.

L'intrigante absence de culture animale

L'hypothèse que chacun des grands traits des cultures humaines se rapporte, en dernière analyse, à quelque module cérébral hérité de notre passé évolutif se heurte à une objection élémentaire. Si nous partageons la plupart, sinon tous ces modules avec les autres primates, comment

expliquer que notre espèce soit la seule à avoir connu une explosion culturelle depuis quelques dizaines de milliers d'années ? En dépit de débats récents sur l'étendue des cultures animales, il est incontestable que l'*Homo sapiens* présente, en ce domaine, une authentique singularité. Chez le chimpanzé, des décennies d'observations éthologiques n'ont révélé que trente-neuf traits culturels authentiques, c'est-à-dire des comportements qui varient d'un groupe à l'autre au sein de la même espèce, sont transmis à travers les générations et ne sont pas imposés par l'écologie locale[357]. Les défenseurs de la culture chimpanzé croient triompher lorsqu'ils démontrent que ce n'est qu'à quatre sites sur les sept étudiés que les chimpanzés frappent dans les mains afin d'attirer l'attention pour se faire épouiller ou que seuls les chimpanzés de Mahale, en Tanzanie, songent à se curer le nez avec un bâton !

Il ne s'agit pas de nier l'intérêt de ces observations, qui nuancent la singularité culturelle humaine et tentent de la rattacher à des phénomènes de transmission inconsciente ou d'imitation déjà présents chez l'animal. Toutefois, la rareté et la pauvreté de contenu des cultures animales offrent un vif contraste avec l'immense liste de traditions culturelles que le moindre groupe humain, même de très petite taille, développe spontanément.

Le cas des arts graphiques est édifiant. On ne connaît pratiquement pas une société humaine qui ne pratique le dessin ou la gravure. Ces arts étaient déjà maîtrisés à un remarquable degré de perfection par nos ancêtres du paléolithique supérieur, voici au moins 35 000 ans. Dans de très nombreuses cultures – Eskimos, Indiens des plaines –, ces dessins ont pris une forme symbolique, particulièrement pour dénoter les nombres et, en au moins quatre sites distincts (Sumer, Égypte, Chine, Amérique centrale), une authentique écriture est apparue. Au contraire, pas une seule espèce de grand singe n'a spontanément inventé de représentation picturale.

Cette étonnante absence d'invention graphique chez les primates non humains ne semble pas liée à une contrainte visuelle ou motrice. Dès l'âge de 1 an, un petit chimpanzé placé devant une tablette graphique parvient à produire des points, des traits et des courbes[358] (figure 8.1). Selon l'auteur de ces expériences, Tetsuro Matsuzawa, les chimpanzés possèdent même une « motivation intrinsèque pour le dessin ». Lorsque la tablette graphique est programmée pour ne plus laisser de traces sur l'écran, ils cessent de

l’utiliser, ce qui semble indiquer que « les marques graphiques possèdent une certaine valeur de renforcement pour eux ». Pourquoi, alors, mis en présence de matériel de dessin ou de peinture, les chimpanzés ne développent-ils pas autre chose que quelques assemblages de taches colorées qui, sans être entièrement aléatoires, ne semblent pas non plus dirigées vers un but ? Comment expliquer cette immense distance qui nous sépare de nos cousins si proches si, par hypothèse, l’invention culturelle émerge d’une reconversion de dispositifs cérébraux que l’espèce humaine partage, pour la plupart, avec les autres espèces de primates ?

Figure 8.1 Chez les primates non humains, la production d’écrits et de graphiques reste minimale. Un jeune chimpanzé, dès 13 mois, peut apprendre à contrôler une tablette graphique pour y tracer quelques courbes (à gauche, d’après Tanaka et coll., 2003). La « composition » de droite a été produite par un chimpanzé adulte, vivant en semi-liberté dans la réserve forestière de Mefou au Cameroun, à qui l’on a procuré des pinceaux et de la gouache (© Canadian Ape Alliance).

Plasticité et néoténie

Plusieurs solutions à cette question ont été envisagées. Les modules du cerveau humain présenteraient-ils une plasticité ou une capacité de recyclage dont nos cousins chimpanzés seraient dépourvus ? Il est

indéniable que l'un des traits saillants d'*Homo sapiens*, qui le distinguent des autres primates et même d'*Homo erectus*, est de naître avec un cerveau immature et doté d'une grande plasticité[359]. Par rapport aux autres primates, le bébé humain vient au monde à une étape proportionnellement bien plus précoce de la gestation. Sa maturation synaptique se prolonge également sur une période étendue de plusieurs années.

Cependant, s'il est probable que cette plasticité prolongée contribue à l'adaptabilité de notre espèce, je doute qu'elle joue un rôle dominant dans notre capacité d'invention culturelle. En effet, ce n'est pas la capacité de recyclage neuronal, en soi, qui semble manquer à nos cousins les primates, mais plutôt la capacité de s'inventer de nouveaux objets culturels. De nombreuses expériences soulignent que les réseaux cérébraux des primates sont capables d'apprentissage, et parfois même d'une reconversion radicale.

En veut-on quelques exemples ? Au fil de notre parcours, j'ai cité les travaux de Nikos Logothetis et de Yasushi Miyashita, qui ont montré que même des singes macaques peuvent apprendre à reconnaître des formes arbitraires de courbes et de fractales. Après l'apprentissage, l'enregistrement des cellules de leur cortex temporal inférieur a montré que ces neurones s'étaient reconvertis radicalement, et sans difficulté apparente, pour se spécialiser dans la reconnaissance de ces images nouvelles[360]. D'autres expérimentateurs sont allés plus loin : ils ont appris à plusieurs chimpanzés et même à des singes macaques à reconnaître les formes des chiffres arabes, au point de savoir très rapidement les ordonner ou les associer aux quantités correspondantes[361].

Sur le plan moteur, également, le singe macaque présente une remarquable capacité d'adaptation aux outils. Atsushi Iriki et ses collègues de l'Université de Tokyo ont montré qu'un macaque apprend facilement à se servir d'un râteau afin de manipuler des objets distants – et ce sans retour visuel direct, mais simplement en voyant les effets de ses gestes sur un écran d'ordinateur[362]. Cet apprentissage semble lié à une petite région pariétale antérieure qui pourrait être le précurseur des régions humaines impliquées dans la programmation de gestes complexes, y compris ceux de l'écriture. Dans cette région, apprendre à manipuler des outils modifie les champs récepteurs des neurones, l'expression de gènes liés à des facteurs neurotrophiques, et même les connexions en provenance des aires corticales postérieures.

Si un singe macaque peut ainsi apprendre l'usage de symboles et d'outils, ce n'est donc pas pour des raisons liées à une moindre plasticité cérébrale que l'innovation culturelle fait défaut aux primates non humains. Ce qui leur manque, de toute évidence, ce n'est pas la capacité d'apprendre, mais plutôt celle d'inventer et de transmettre des objets culturels nouveaux.

Une sensibilité à l'esprit d'autrui

Une autre hypothèse a été proposée : seul le cerveau humain serait « préadapté » pour la transmission culturelle. Michael Tomasello soutient explicitement ce point de vue :

> « Les humains sont biologiquement adaptés à la culture d'une manière distincte de tous les autres animaux. La différence est manifeste lorsque l'on compare les compétences d'apprentissage social des humains et de leurs plus proches cousins les primates. Au cours de l'ontogenèse, l'adaptation humaine à la culture se manifeste vers 1 an, âge auquel les enfants humains commencent à comprendre que les autres personnes sont des agents intentionnels, tout comme eux. C'est cette compréhension qui leur donne accès à des formes uniques et puissantes d'apprentissage culturel, parce qu'ils lisent les intentions des autres à mesure qu'ils apprennent d'eux[363]. »

Selon Tomasello, c'est donc la transmission culturelle qui fait la singularité de l'espèce humaine. Elle serait liée à l'expansion d'un module cérébral spécialisé dans la « théorie de l'esprit », la représentation mentale des intentions et des croyances de nos congénères. Ce module cérébral aurait un impact triplement positif sur la propagation culturelle. Tout d'abord, les adultes parviendraient à se représenter les connaissances de leurs enfants, ce qui les motiverait à transmettre des informations ou des techniques nouvelles et à inventer de véritables stratégies pédagogiques – pour le primatologue David Premack, la pédagogie est le propre de l'homme. De leur côté, les enfants prêteraient attention aux intentions des adultes. Ils ne se contenteraient pas d'imiter servilement leurs actions, mais le feraient en pleine compréhension du but recherché[364]. Enfin, la « théorie de l'esprit » permettrait à chaque membre de l'espèce humaine de se représenter soi-même, de prêter attention à ses propres états mentaux, et donc de les manipuler par le biais d'inventions culturelles nouvelles.

Des dizaines d'expériences montrent effectivement que, très tôt, les enfants humains présentent une remarquable sensibilité aux intentions communicatives des personnes qui les entourent et une capacité de s'identifier à eux. Ce partage des intentions joue un rôle fondamental dans l'apprentissage des symboles du langage[365]. Contrairement à une vision

béhavioriste encore trop répandue, les enfants n'apprennent pas les mots par simple association répétée avec les objets correspondants. Lorsqu'ils entendent un adulte prononcer un mot, ils commencent par lever les yeux afin de vérifier quelle est la chose à laquelle la personne se réfère. C'est seulement lorsqu'ils ont compris à quoi pense le locuteur – en tenant compte des indices qu'ils peuvent avoir sur sa compétence et ses connaissances – qu'ils assignent un sens au mot. Ainsi, aucun apprentissage n'est observé si un haut-parleur, fixé au plafond, se contente de répéter un mot en association fixe avec la p*résentation d'un objet.*

Selon Tomasello, cette sensibilité humaine à l'état d'esprit d'autrui ne résulte pas d'une mutation soudaine. Des prémisses de la représentation des intentions, des croyances et des buts sont déjà présentes dans la lignée des grands primates. Elles sont toutefois amplifiées dans l'espèce humaine et s'accompagnent d'une motivation particulière à partager les émotions et les activités d'autres personnes. Rien de tout cela ne détermine, au sens strict, l'émergence de la culture humaine. Mais il se produit, à un moment donné, un effet de « cliquet culturel » : toute invention nouvelle se transmet plus rapidement au groupe social. La transmission par l'imitation intelligente et la pédagogie active stabilise les représentations culturelles, par-delà les générations, rendant possible une accumulation progressive d'inventions.

Il me semble cependant que l'hypothèse de Tomasello n'explique que pour moitié l'extraordinaire développement de la sphère culturelle chez l'homme. Elle rend bien compte de son expansion rapide, de sa propagation presque épidémique à partir d'un foyer local, et du caractère stable, voire irréversible de nos plus belles inventions culturelles : citons en vrac le feu, l'agriculture, l'élevage, la ville, l'écriture, le système légal, etc. Mais elle ne dit rien de l'étincelle initiale qui produit l'invention. Certes, l'espèce humaine propage et stabilise la culture. Mais elle est également la seule à la créer, avec une inventivité unique dans le monde animal et que l'on perçoit dans les jeux de n'importe quel enfant de 3 ans. Ne faut-il pas, pour l'expliquer, postuler un autre changement biologique majeur : l'accroissement massif, chez l'homme, de la capacité de synthèse et de recombinaison consciente ?

Le for intérieur

Lorsque l’on compare l’anatomie du cerveau de l’homme à celle du cerveau des autres primates, des premiers hominidés, ou même de l’homme de Néanderthal, un trait saillant de notre espèce est l’expansion disproportionnée du lobe frontal. La surface de cette région antérieure des hémisphères cérébraux, comme celle des régions pariétales, est 20 à 40 fois plus grande chez l’homme que chez le singe macaque[366].

La plus notable des adaptations humaines est l’expansion des faisceaux de connexions qui forment la substance blanche sous-jacente au cortex frontal[367]. Certains faisceaux à très longue distance, tels ceux qui relient directement le pôle occipital au cortex préfrontal inférieur, semblent même n’exister que chez l’homme (figure 8.2). Les neurones pyramidaux du cortex préfrontal humain présentent de nettes adaptations à cet accroissement de connectivité : leurs arborisations sont plus touffues et les contacts synaptiques massivement plus nombreux[368]. Il semblerait même qu’une catégorie particulière de neurones n’existe que chez les grands singes anthropoïdes, dont l’*Homo sapiens*[369]. Ces cellules, appelées « fusiformes géantes », se situent dans le cortex cingulaire et établissent des liens à très grande distance avec le reste du cortex.

Ces changements de connectivité s’accompagnent certainement de modifications fonctionnelles. À quoi servent toutes ces connexions en direction du lobe frontal ? Jean-Pierre Changeux et moi-même avons proposé une hypothèse simple : elles rassembleraient, dans un espace de travail cortical commun, des informations issues de régions cérébrales distantes pour mieux les diffuser ensuite à l’échelle de tout le cerveau.

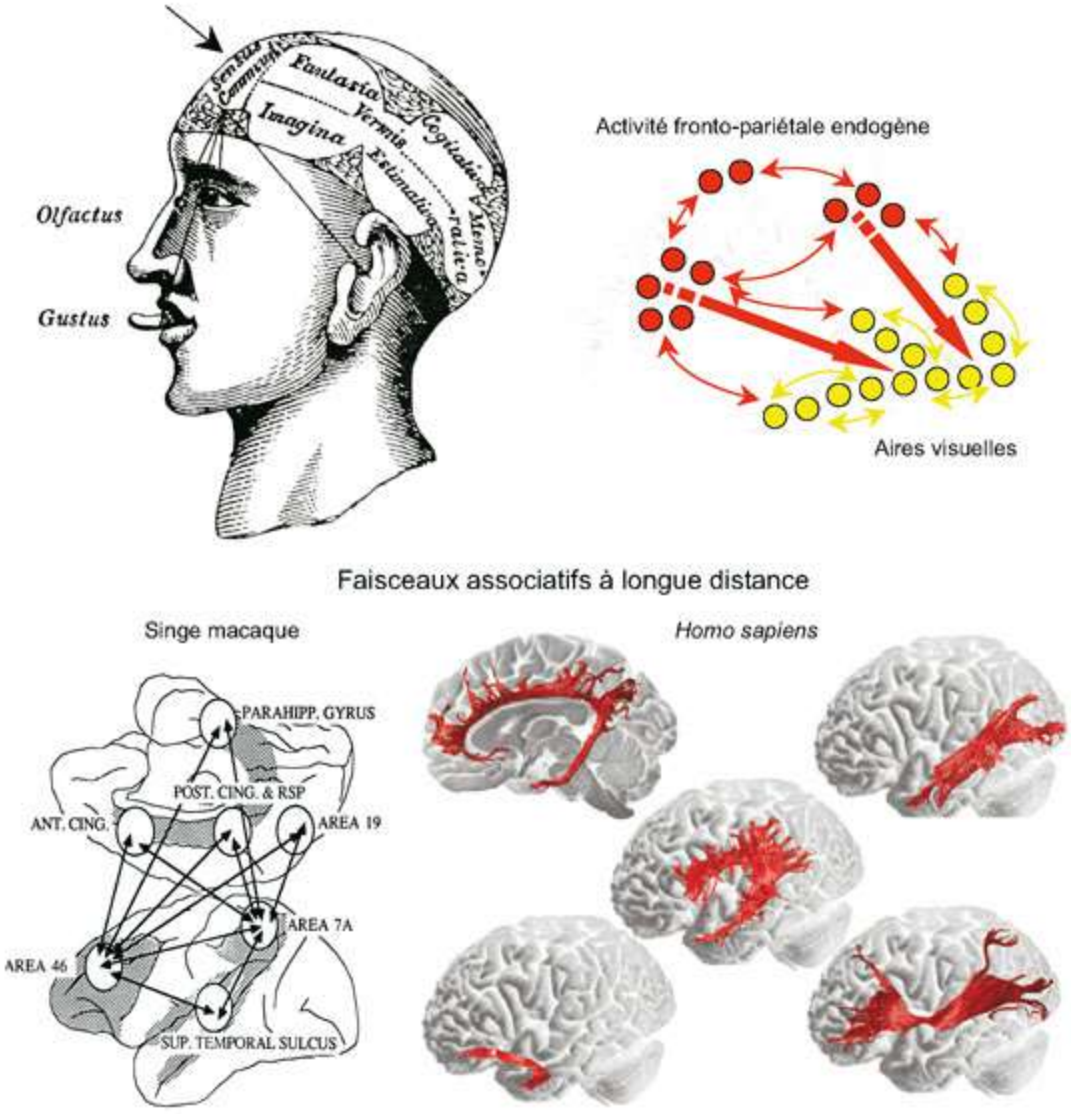


Figure 8.2 La lecture n'est qu'un exemple de l'extraordinaire inventivité de l'espèce humaine, la seule qui parvienne à réutiliser ses circuits corticaux pour des activités culturelles nouvelles. L'idée aristotélicienne d'un « sens commun », où la fusion des cinq sens est associée à l'imagination et à l'invention, trouve comme un écho dans la découverte de vastes faisceaux de connexions, particulièrement développés chez l'homme, qui rassemblent et recombinent de façon flexible les informations issues des différentes aires cérébrales. Ces réseaux sont le siège d'une incessante activité spontanée endogène. Jean-Pierre Changeux et moi postulons que la rencontre entre cette activité spontanée et les entrées sensorielles est associée à la prise de conscience du monde extérieur, et qu'elle permet également l'exploration et l'invention au sein d'un « milieu conscient » intérieur.

Par-delà la modularité du cortex, qui se subdivise en multiples territoires spécialisés, l'espèce humaine disposerait d'un système évolué de connexions transversales qui augmente la communication et brise la modularité cérébrale. Ses fonctions ? Rassembler, confronter, recombiner, synthétiser ; éviter le fractionnement des connaissances ; permettre que notre comportement futur soit guidé par l'ensemble des informations

disponibles, présentes ou passées. Le lobe frontal, en connexion avec de multiples aires cérébrales associatives du cortex cingulaire et des lobes pariétaux et temporaux, fournirait un espace de délibération interne, informé de l'ensemble de nos perceptions et de nos souvenirs, mais détaché des contingences sensori-motrices immédiates et tourné vers l'avenir.

Ce que nous appelons la conscience serait, tout simplement, l'accès des informations à cet espace de partage mental.

L'association du lobe frontal aux plus hautes fonctions intellectuelles n'est évidemment pas nouvelle. Dans les trente dernières années, nombreux sont les physiologistes (notamment Patricia Goldman-Rakic ou Joaquim Fuster) et neuropsychologues (le Russe Alexander Luria, le Français François Lhermitte, l'Anglais Tim Shallice) à l'avoir noté. Ils ont observé que les lésions frontales, sans affecter les comportements élémentaires ou automatisés, entraînaient des troubles de l'organisation de la pensée et de l'intégration de l'action vers un but. Un siècle auparavant, les expériences pionnières de Leonardo Bianchi sur l'animal et l'homme l'avaient déjà conduit à voir dans le lobe frontal un « organe des synthèses mentales » qui permet la fusion des modalités auditives et visuelles et, chez l'homme, la connexion avec la compréhension et la production du langage[370].

Si l'on remonte plus loin encore, c'est à Aristote et Galien que l'on doit l'hypothèse d'un *sensus communis*, un tribunal intime de la conscience où nous rassemblons nos impressions et nos pensées. Nous rendons implicitement hommage à Aristote lorsque nous parlons de notre « for intérieur », c'est-à-dire le forum mental où nos idées dialoguent et s'entrechoquent. Avicenne, dès l'an mil, localisait ces compétences aux régions frontales du cerveau, quoiqu'il les situât dans ses cavités ou ventricules plutôt que dans son enveloppe de matière grise :

> « L'une des facultés animales de perception interne est la capacité d'imagination ou *sens commun*, localisée à la partie antérieure du ventricule frontal du cerveau. Celui-ci reçoit toutes les formes qui s'impriment sur les cinq sens et lui sont transmises. Ensuite vient la faculté de représentation, localisée à la partie arrière du ventricule frontal, qui préserve ce que le sens commun a reçu, même en l'absence de l'objet perçu. […] Ensuite vient la faculté d'"imagination sensible", en lien avec l'âme animale, et d'"imagination rationnelle", en lien avec l'âme humaine, et localisée au ventricule médian[371]. »

Avicenne associe déjà trois propriétés qu'il suppose présentes chez l'animal, mais étendues chez l'homme : la *synthèse* des cinq sens ; la *mémoire* qui maintient cette synthèse « en ligne » ; et l'*imagination*, qui permet d'enrichir la perception et, couplée à la raison, de projeter des

solutions nouvelles pour atteindre un but. Avec une curieuse préscience, il anticipe là trois découvertes majeures des neurosciences du lobe frontal :

les cellules du cortex préfrontal sont effectivement multimodales. D'une expérience à l'autre, on les découvre capables de rassembler toutes les informations pertinentes à un instant donné, qu'elles soient auditives, visuelles, tactiles ou motrices ;

d'autre part, elles présentent une remarquable capacité de rester en activité, même après la disparition de l'objet perçu, tant que son souvenir offre une utilité à court terme. La mémoire de travail à court terme reposerait sur l'activité soutenue de ces neurones préfrontaux ;

enfin, et c'est une découverte récente de l'imagerie cérébrale, les régions préfrontales présentent une activité spontanée et fluctuante qu'il est tentant d'associer au flot de la conscience et à l'imagination[372]. Lorsqu'un volontaire passe un examen d'imagerie au repos, sans que rien ne lui soit demandé, l'activité corticale n'est pas nulle, mais oscille sans cesse entre des états coordonnés partiellement aléatoires[373]. D'un moment à l'autre, différents secteurs du cortex frontal s'allument, étroitement associés à des territoires distants des lobes pariétaux, temporaux ou occipitaux. L'activation endogène de ces réseaux caractérise l'état de veille consciente chez l'homme : elle ne disparaît que dans le sommeil profond, l'anesthésie ou le coma[374].

Résumons-nous. Le cerveau humain semble avoir connu une évolution particulière. Un vaste réseau de connexions, impliquant particulièrement le cortex préfrontal, s'est massivement accru au cours de l'évolution de ce primate singulier qu'est *Homo sapiens*. Il permet la confrontation des informations issues de multiples modules et leur activation à volonté, avec une marge de fluctuation. J'émets l'hypothèse que l'existence de ce réseau, l'apparition d'une conscience réflexive et la compétence culturelle de l'espèce humaine sont des phénomènes étroitement liés.

Tout au long de ce livre, je n'ai fait que proposer une idée : celle que nos inventions culturelles, comme la lecture, résultent du détournement de fonctions cérébrales préexistantes. L'activité spontanée et fluctuante du cortex frontal fournit un mécanisme neuronal à cette théorie du recyclage. Je formule l'hypothèse que c'est grâce à ce nouveau réseau de connexions que notre espèce, seule parmi les primates, parvient à jouer mentalement avec les idées jusqu'à les détourner vers des usages imprévus.

Grâce à l'espace de travail neuronal, nous pouvons amener à la conscience une infinité d'idées et les recombiner en synthèses nouvelles. L'activité spontanée du cortex frontal explore en permanence les diverses possibilités de rapprochement entre les contenus des processeurs cérébraux. De ces amalgames neuronaux fluctuants émerge peut-être la compétence particulière de notre espèce pour l'invention de nouveaux objets culturels. Cette activité, pour être fluctuante, n'erre pas entièrement au hasard. À l'échelle de l'individu, comme à celle de la société, nous sélectionnons les combinaisons d'idées les plus intéressantes, les plus utiles, ou parfois simplement les plus choquantes ou les plus contagieuses. Le cortex préfrontal dorsolatéral reçoit d'ailleurs des projections privilégiées des circuits d'évaluation et de renforcement associés notamment à la voie dopaminergique ascendante et aux cortex cingulaire et orbito-frontal.

Le lecteur attentif trouvera, dans mon hypothèse d'une exploration des circuits corticaux par le cortex préfrontal, une réminiscence de l'idée de Sperber, selon qui toutes les cultures humaines jouent avec la frange de variabilité de leurs modules cérébraux. Cependant, la fonction de synthèse combinatoire enrichit considérablement le modèle de Sperber. Le réseau de connexions à longue distance qui culmine chez l'*Homo sapiens* permet la confrontation de modules cérébraux qui, en leur absence, ne communiqueraient pas. Je suis convaincu que les inventions culturelles naissent souvent de telles métaphores ou de mises en liaison nouvelles[375]. L'invention de la lecture, en particulier, ne correspond pas seulement à la création d'un jeu de signes qui stimulent efficacement notre cortex visuel. Elle est avant tout mise en connexion de ces signes avec les aires auditives, phonologiques et lexicales responsables de la compréhension du langage parlé. Si l'idée de cette connexion n'est jamais venue à d'autres grands singes, c'est peut-être parce que l'architecture de leur cerveau, contrairement à la nôtre, ne permet pas de mettre à l'épreuve cette combinaison nouvelle.

De nombreux chercheurs sont arrivés, par des voies très différentes, à la même conclusion : notre espèce présente des compétences particulières pour la synthèse des contenus qui, chez les autres mammifères, restent dispersés dans de multiples régions spécialisées du cerveau. Ainsi Elizabeth Spelke, psychologue à Harvard, étudie le sens de l'espace chez l'enfant. Ses travaux suggèrent qu'avant 5 ou 6 ans, les compétences des enfants sont

modulaires : avec leur sens de la couleur, ils peuvent coder qu'un objet est caché à côté du mur vert et, avec leur sens de la position, qu'il est dans le coin gauche de la pièce, mais ce n'est qu'à partir de 6 à 8 ans que les enfants parviennent à représenter un concept tel que « à gauche du mur vert[376] ». Cette capacité de synthèse de deux représentations disparates serait dépendante du langage et singulière à l'espèce humaine[377].

Annette Karmiloff-Smith, de l'Institute of Child Health de Londres, développe une théorie apparentée selon laquelle l'enfant, au cours de son développement cognitif, apprend à aller « au-delà de la modularité[378] ». Une fraction de son cerveau (peut-être le cortex préfrontal ?) apprend à « re-représenter », sous une forme explicite et abstraite, les connaissances implicites logées dans des modules spécialisés. L'apprentissage de l'alphabet fournit un excellent exemple de telle « re-représentation » : dès la naissance, la connaissance des phonèmes est déjà présente, d'une façon implicite, dans les aires du langage du nourrisson, mais ce n'est qu'avec l'alphabétisation qu'apparaît la conscience phonémique, c'est-à-dire la représentation explicite des phonèmes et la capacité de les manipuler consciemment.

Dans le domaine des mathématiques, j'ai moi-même souligné combien l'invention repose sur l'établissement de liens ou de métaphores entre domaines différents (sens du nombre, de l'espace, du temps[379]). Dans celui de la création artistique, Jean-Pierre Changeux voit, dans la recherche d'un consensus harmonieux entre modules cérébraux, l'essence même de l'art ; le propre de l'homme, dans ce domaine, serait de rechercher sans cesse de nouvelles combinaisons mentales. Enfin, l'archéologue Steven Mithen parvient à une conclusion semblable à partir d'une tout autre perspective : l'examen des vestiges d'outils que nos ancêtres ont laissés et dont la complexification progressive accompagne l'hominisation. Pour lui, le succès de notre espèce résulte d'une mutation qui aurait permis aux multiples « chapelles » d'intelligence spécialisée de notre esprit de fusionner en une seule vaste « cathédrale » où les pensées circulent avec fluidité[380].

Ainsi commence à s'esquisser un consensus autour d'une idée simple : le cerveau de notre espèce serait un spécialiste de la recombinaison mentale, il aurait évolué afin d'exploiter au mieux la niche cognitive du recyclage neuronal. Seule notre espèce, par le biais de son espace de travail

conscient, parvient à réutiliser ses modules cérébraux selon des enchaînements nouveaux et des algorithmes novateurs. Notre cortex préfrontal fonctionne comme une machine de Turing humaine, certes lente et imparfaite, mais dont les inventions, accumulées par transmission culturelle au fil des millénaires, ont mille fois dépassé les compétences que notre espèce avait héritées de son évolution biologique. La lecture fait partie de ce « nouvel héritage » qu'il nous appartient aujourd'hui de transmettre au mieux aux prochaines générations.

Conclusion

L’avenir de la lecture

> « L’écriture – l’art de communiquer les pensées à l’esprit par les yeux – est la grande invention du monde. Grande, dans l’étonnant pouvoir d’analyse et de combinaison qu’elle implique, même dans son acception la plus simple et la plus générale ; grande, très grande en ce qu’elle nous permet de converser avec les morts, avec les absents, avec ceux qui ne sont jamais nés, à travers toutes les distances du temps et de l’espace ; et grande, non seulement dans ses avantages immédiats, mais aussi dans l’aide immense qu’elle apporte aux autres inventions. »
>
> Abraham LINCOLN

Au terme de notre voyage cortical, la lecture apparaît, à la fois comme le fruit de l’évolution humaine et comme l’un des acteurs majeurs de son explosion culturelle. L’expansion de notre cortex préfrontal, cette « cathédrale » de l’esprit, a permis à notre espèce d’inventer l’écriture. À son tour, cette invention a dopé nos capacités mentales en nous dotant d’une véritable mémoire supplémentaire, externe et durable, qui nous permet d’« écouter les morts avec les yeux », comme le soulignait le poète Francisco de Quevedo, et de réveiller, à plusieurs siècles de distance, la pensée des écrivains disparus. À ce titre, la lecture est la première « prothèse de l’esprit[381] » – une prothèse que des générations de scribes ont adaptée au mieux aux circuits de nos cerveaux de primates.

Les neurosciences de la lecture montrent que chaque cerveau d’enfant dispose de circuits neuronaux capables d’apprendre à lire. C’est pourquoi je reste résolument optimiste, en dépit d’un incessant battage médiatique qui insinue qu’une fraction toujours croissante de nos concitoyens ne sait pas lire. Même chez l’enfant dyslexique, ou chez l’adulte illettré, des solutions existent. La plasticité cérébrale est telle qu’il est possible de contourner les

difficultés de lecture par des voies cérébrales inhabituelles. Nous n'en sommes pourtant qu'aux premiers balbutiements de la science de la lecture. La meilleure compréhension du développement de la lecture, l'apparition de logiciels éducatifs et leur optimisation au cerveau de l'enfant offrent de grands espoirs à tous ceux pour qui lire reste une épreuve.

Qu'on me comprenne bien : je ne prétends évidemment pas que les neurosciences auront bientôt balayé toutes les difficultés pédagogiques ni que l'ordinateur, optimisé par les cogniticiens, remplacera prochainement les enseignants. Mon message est plus modeste : un peu de science ne peut pas nuire, et il importe que les parents et les éducateurs aient une idée claire des changements que la lecture opère dans le cerveau de l'enfant. Son système visuel et ses aires du langage forment une magnifique petite machine neuronale que l'éducation recycle en un système expert de lecture. En comprendre le fonctionnement intime ne peut que faciliter l'enseignement de la lecture – telle est ma profonde conviction.

Je ne prétends pas non plus que les neurosciences, à terme, se substitueront à la psychologie expérimentale et à la pédagogie. Au laboratoire, ce sont avant tout les psychologues qui définissent les protocoles d'imagerie cérébrale de la lecture. Dans la classe, également, l'enseignant reste le seul maître à bord. C'est à lui d'inventer les exercices, les astuces et les jeux qui parviendront à éveiller les enfants à la lecture. Il y rencontre des difficultés particulières qui requièrent une expertise pédagogique que je respecte profondément. Je crois simplement que ni le psychologue ni l'enseignant ne peuvent se permettre d'ignorer les connaissances scientifiques qui expliquent pourquoi le cerveau de l'enfant est plus ou moins réceptif à telle ou telle méthode de lecture.

J'appelle donc de mes vœux une unification des recherches pédagogiques, psychologiques et neuroscientifiques afin d'étendre la science de la lecture. La question la plus difficile qui nous est posée est celle des conditions optimales de son enseignement – comment faudrait-il procéder pour que tous les enfants apprennent à lire sans larmes ? Afin de répondre à cette question, pourquoi ne pas envisager la création de classes expérimentales, voire de laboratoires de recherche en milieu scolaire, où serait menée une véritable expérimentation pédagogique ? Enseignants et chercheurs s'y côtoieraient quotidiennement, imagineraient ensemble de nouvelles méthodes d'enseignement, et se poseraient l'un l'autre des

questions stimulantes. Vaut-il mieux enseigner le geste d'écriture en même temps que la reconnaissance des lettres ? Est-il utile de faire rédiger, très tôt, de petites phrases ? Gagnerait-on du temps à attirer explicitement l'attention des enfants sur le piège des lettres symétriques comme « b » et « d » ? Personne ne peut prétendre, aujourd'hui, connaître les réponses à ces questions, mais nous devons les rechercher ensemble par des méthodes les plus rigoureuses possible.

Nul ne devrait également ignorer que certaines questions sont fermement résolues. Ainsi, on sait aujourd'hui que les méthodes globales ou idéovisuelles ne fonctionnent pas : tous les enfants, quelle que soit leur origine sociale, bénéficient d'un apprentissage explicite et le plus précoce possible des correspondances entre lettres et sons du langage[382]. C'est un fait établi, soutenu par de nombreuses expériences pédagogiques, et cohérent avec ce que nous comprenons de l'organisation du cerveau du lecteur. Revenir en arrière sur ce point, sous prétexte d'expérimenter ou d'exercer sa liberté d'enseignant, serait *criminel.*

À mesure qu'émerge un consensus scientifique sur les mécanismes de la lecture, son enseignement devrait progressivement se transformer en une authentique « neuro-psycho-pédagogie » : une science unifiée et cumulative où la liberté de l'enseignant n'est pas niée, mais tournée vers la recherche pragmatique d'un enseignement mieux structuré et plus efficace. Le concept exigeant d'expérimentation est l'une des belles idées que la science peut apporter à la pédagogie. Expérimenter, ce n'est pas essayer le matin même une idée qui vous est venue la veille au soir. Expérimenter exige au contraire de concevoir avec patience, minutie, et en prenant en compte toutes les connaissances passées, une manipulation nouvelle de la stratégie d'enseignement qui sera comparée avec une situation de contrôle (un autre jour, un autre exercice, une autre classe). Je suis persuadé qu'il est possible d'améliorer, très significativement, l'enseignement de la lecture en France. Je suis également persuadé que cela demandera beaucoup de rigueur et d'attention, non seulement aux découvertes cognitives récentes, mais également à la vaste expérience pratique des experts que sont les enseignants.

Il est fréquent, enfin, d'attribuer une étiquette politique aux questions scientifiques qui relèvent de l'éducation. Ainsi la méthode globale a-t-elle été défendue par une certaine gauche au nom de la liberté de l'enfant : elle

seule lui permettrait de se construire ses représentations à son rythme, sans qu'on lui impose le « totalitarisme » du décodage et de l'orthographe. Inversement, un réflexe infondé étiquette comme étant « de droite » la thèse – pourtant proche de l'évidence – que l'organisation cérébrale et le patrimoine génétique contraignent les apprentissages. Et l'on ne sait que trop comment valsent les programmes scolaires au gré des réformes que chaque nouveau ministre croit devoir imposer lorsqu'il parvient au pouvoir.

Ces confusions, parfois sciemment entretenues, entre les questions scientifiques et les choix politiques alimentent les polémiques stériles au détriment de la recherche de la vérité, et les enfants en sont toujours les premières victimes. Il est inacceptable que l'étiquetage tienne lieu de réflexion ou que l'intuition d'un homme politique se substitue aux connaissances scientifiques patiemment accumulées. Rétablissons donc au plus vite certaines vérités simples sur l'enseignement de la lecture. Non, tous les enfants ne sont pas différents : leurs rythmes d'apprentissage peuvent varier, mais tous possèdent les mêmes circuits cérébraux et tous bénéficient d'un apprentissage rigoureux des correspondances graphèmes-phonèmes. L'école de la liberté n'est pas celle qui laisse l'enfant choisir les textes qu'il souhaite apprendre, mais bien celle qui enseigne rapidement à chaque enfant le décodage – la seule méthode qui lui permettra d'apprendre lui-même des mots nouveaux, d'acquérir son autonomie et de s'ouvrir à tous les champs du savoir. Cet enseignement peut se faire dans des classes normales de vingt-cinq ou trente élèves, avec une pédagogie et des exercices de groupe planifiés avec rigueur au niveau national. Mais il faut, bien entendu, se donner les moyens de repérer au plus vite les enfants dyslexiques, par le biais de tests audiovisuels standardisés, afin qu'ils bénéficient d'une pédagogie renforcée en exercices phonologiques. Enfin, l'apprentissage du décodage ne suffit pas, il importe aussi de renforcer le vocabulaire de l'enfant et de lui enseigner la morphologie de notre langue (préfixes, suffixes, racines des mots), particulièrement s'il vient d'une famille socialement défavorisée ou dont la langue maternelle n'est pas le français.

Ces idées, et bien d'autres développées dans ce livre, ne sont ni de droite ni de gauche : elles sont les premiers fruits de cette nouvelle science de la lecture dont j'ai décrit les avancées récentes. Mieux comprendre l'organe qui nous fait lire, mieux transmettre à nos enfants cette

remarquable invention qu’est la lecture, rendre ces connaissances utiles au plus grand nombre, tels sont les défis pour l’avenir. Car je relis toujours avec bonheur la profession de foi d’un grand lecteur, l’humaniste Jacques Amyot (1513-1593) :

> « La lecture qui plaît et profite, qui délecte et instruit ensemble, a tout ce que l’on sauroit désirer. »

Notes

1- *Cf.* Noam Chomsky, *Aspects de la théorie syntaxique*, Paris, Seuil, 1971.

2- Gould, 1992.

3- Dawkins, 1996.

4- Changeux, 1983.

5- Rayner & Bertera, 1979.

6- Rayner, 1998.

7- Sere, Marendaz & Herault, 2000.

8- Morrison & Rayner, 1981 ; O'Regan, 1990.

9- René Descartes, *Première Méditation*, paragraphe 12.

10- McConkie & Rayner, 1975.

11- Rayner, Well & Pollatsek, 1980 ; Rayner, Inhoff, Morrison, Slowiaczek & Bertera, 1981 ; pour une revue, voir Rayner, 1998.

12- Pollatsek, Bolozky, Well & Rayner, 1981.

13- Rubin & Turano, 1992.

14- Voir Rayner & Pollatsek, 1989, p. 440-449.

15- Paap, Newsome & Noel, 1984 ; Besner, 1989 ; Mayall, Humphreys & Olson, 1997 ; Mayall, Humphreys, Mechelli, Olson & Price, 2001.

16- McConkie & Zola, 1979 ; Rayner, McConkie & Zola, 1980.

17- Rastle, Davis, Marslen-Wilson & Tyler, 2000 ; Longtin, Segui & Hallé, 2003.

18- La décomposition en morphèmes est-elle systématique, même pour des mots comme « repaire » où elle induit en erreur ? Survient-elle précocement, ou seulement après l'accès au lexique mental ? Ces questions font encore l'objet d'un vif débat, tant expérimental que théorique. Voir par exemple Caramazza, Laudanna & Romani, 1988 ; Taft, 1994 ; Ferrand, 2001, chapitre 5.

19- En cas d'ambiguïté, j'utiliserai des guillemets pour signaler l'aspect visuel des mots et des lettres, et l'italique pour représenter leur prononciation. Ainsi, le mot « chaud » se prononce *cho*.

20- Rey, Jacobs, Schmidt-Weigand & Ziegler, 1998 ; Rey, Ziegler & Jacobs, 2000.

21- Prinzmetal, Treiman & Rho, 1986 ; voir aussi Prinzmetal, 1990.

22- Saint Augustin, *Confessions*, Livre sixième, chapitre III. Les citations de saint Augustin et d'Isidore de Séville sont rapportées par Manguel, 1998.

23- Rubenstein, Lewis & Rubenstein, 1971 ; Coltheart, Davelaar, Jonasson & Besner, 1977 ; Seidenberg, Petersen, MacDonald & Plaut, 1996 ; Ferrand, 2001, chapitre 4.

24- Van Orden, Johnston & Hale, 1988 ; Jared & Seidenberg, 1991.

25- Cités par Gagnière, 1997, p. 989

26- Expériences en langue anglaise : Perfetti & Bell, 1991 ; Lukatela, Frost & Turvey, 1998 ; en langue française : Ferrand & Grainger, 1992, 1993, 1994.

27- Poète provençal cité par Gagnière, 1997, p. 832

28- Shakespeare, *Peines d'amour perdues* (traduction François-Victor Hugo).

29- Shaw détestait les irrégularités de l'orthographe anglaise à tel point qu'il légua, par testament, une forte somme pour la conception d'un nouvel alphabet entièrement rationnel, le Shavien. Celui-ci vit le jour, mais il s'écartait tant de toutes les écritures existantes qu'il ne fut jamais adopté (Coulmas, 1989, p. 251).

30- Coulmas, 1989.

31- Wydell & Butterworth, 1999.

32- Marshall & Newcombe, 1973 ; Shallice, 1988 ; McCarthy & Warrington, 1990 ; Coltheart & Coltheart, 1997.

33- Seidenberg & McClelland, 1989.

34- Seidenberg & McClelland, 1989 ; Grainger & Jacobs, 1996 ; Plaut, McClelland, Seidenberg & Patterson, 1996 ; Ans, Carbonnel & Valdois, 1998 ; Zorzi, Houghton & Butterworth, 1998 ; Coltheart, Rastle, Perry, Langdon & Ziegler, 2001 ; Harm & Seidenberg, 2004. Le modèle le plus récent, DRC+ (Perry, Ziegler & Zorzi, 2007), présente une intéressante synthèse de ces différentes propositions théoriques.

35- Selfridge, 1959.

36- Dennett, 1978.

37- McClelland & Rumelhart, 1981 ; Rumelhart & McClelland, 1982.

38- Weekes, 1997 ; Lavidor & Ellis, 2002 ; toutefois, cela n'est vrai que si les mots sont familiers et apparaissent dans leur orientation horizontale normale, au centre ou un peu à droite de la fovéa (Lavidor, Babkoff & Faust, 2001 ; Lavidor & Ellis, 2002 ; Ellis, Young & Anderson, 1988 ; Ellis, 2004).

39- Reicher, 1969 ; Ferrand, 2001, p. 58-63.

40- Spoehr & Smith, 1975 ; Rumelhart & McClelland, 1982.

41- Nous verrons au chapitre 3 comment les réflexions récentes sur le codage neuronal des mots viennent nuancer cette définition du voisinage à une lettre près. Si les mots écrits sont codés mentalement par leurs paires de lettres ou « bigrammes », comme le suggèrent plusieurs auteurs (Grainger & Van Heuven, 2003 ; Grainger & Whitney, 2004 ; Dehaene, Cohen, Sigman & Vinckier, 2005), sans doute faudrait-il adopter comme mesure du voisinage orthographique le nombre ou la proportion de bigrammes que partagent les mots.

42- La littérature sur les effets de voisinage est considérable et parfois contradictoire, sans doute à cause des effets opposés que peut causer la présence de nombreux voisins. Pour une discussion récente, voir Ferrand, 2001, p. 96-115.

43- Segui & Grainger, 1990.

44- Rey et coll., 1998 ; Rey et coll., 2000 ; pour une revue récente de ces effets de compétition à de multiples niveaux au sein de la chaîne de lecture, voir Grainger & Ziegler, 2006.

45- Swinney, Onifer, Prather & Hirshkowitz, 1979 ; Seidenberg, Tanenhaus, Leiman & Bienkowski, 1982.

46- Déjerine, 1892 ; toutes les citations qui suivent sont tirées de ce texte fondateur de la neuropsychologie de la lecture.

47- Warrington & Shallice, 1980 ; Patterson & Kay, 1982 ; Montant & Behrmann, 2000.

48- Cohen & Dehaene, 1995, 2000 ; Gaillard et coll., 2006.

49- Patterson & Kay, 1982 ; Hanley & Kay, 1996.

50- Miozzo & Caramazza, 1998.

51- Fiset et coll. (2005) nuancent ce propos en suggérant que, lorsque l'on contrôle la facilité avec laquelle les lettres peuvent être distinguées les unes des autres, les patients ne prennent pas nécessairement plus de temps pour lire les mots longs que les mots courts. Ainsi, le déficit des patients pourrait s'expliquer par la perte d'un code neural appris dont le rôle essentiel est d'amplifier les petites différences entre les lettres. La lésion de cette région augmenterait la ressemblance entre les lettres (pour qui ne lit pas le chinois, tous les caractères se ressemblent). Au-delà d'un certain seuil, cette similarité accrue forcerait le patient à examiner soigneusement les lettres une par une. Ainsi, dans l'alexie pure, la reconnaissance parallèle des mots ne serait pas totalement abolie, mais seulement détériorée (Arguin, Fiset & Bub, 2002). L'existence d'un traitement parallèle résiduel pourrait expliquer le phénomène de « lecture implicite » où certains patients s'avèrent capables de classifier en fonction de leur sens des mots qu'ils ne parviennent plus à lire à haute voix (Coslett & Saffran, 1989 ; Coslett, Saffran, Greenbaum & Schwartz, 1993). Cependant, il se pourrait également que ces compétences soient l'œuvre de l'hémisphère droit demeuré intact (Coslett & Monsul, 1994 ; Cohen et coll., 2003).

52- Plusieurs schémas anatomiques de référence précisent la localisation de ces régions dans l'espace du cerveau en p. 3.

53- Cohen et coll., 2003 ; le livre de Laurent Cohen *L'Homme thermomètre* constitue une excellente introduction aux troubles de la reconnaissance visuelle.

54- Damasio & Damasio, 1983 ; Binder & Mohr, 1992 ; Leff et coll., 2001.

55- Leff et coll., 2001.

56- Cohen et coll., 2000 ; Cohen et coll., 2002 ; Dehaene, Le Clec'H, Poline, Le Bihan & Cohen, 2002 ; Gaillard et coll., 2006. La pertinence de cette appellation reste toutefois débattue (voir Price & Devlin, 2003 ; Cohen & Dehaene, 2004).

57- Pour des exemples, voir Cohen et coll., 2003, et sa bibliographie.

58- Geschwind, 1965.

59- Petersen, Fox, Posner, Mintun & Raichle, 1988 ; voir également Posner, Petersen, Fox & Raichle, 1988 ; Petersen, Fox, Posner, Mintun & Raichle, 1989 ; Petersen, Fox, Snyder & Raichle, 1990.

60- Dehaene et coll., 2002.

61- Cohen et coll., 2000.

62- On discerne, sur la figure 2.5, une forme de variabilité : si toutes les personnes étudiées activent la région temporale inférieure de l'hémisphère gauche, seules certaines d'entre elles activent également la région homologue de l'hémisphère droit. La source de cette variabilité n'est pas encore bien comprise, mais il se pourrait qu'elle prédise, en cas de lésion à gauche, dans quelle mesure la personne parviendra à récupérer progressivement certaines capacités de lecture (Cohen, Henry et coll., 2004).

63- Hasson, Levy, Behrmann, Hendler & Malach, 2002.

64- Dehaene et coll., 2002 ; Cohen, Jobert, Le Bihan & Dehaene, 2004.

65- Booth et coll., 2002 ; Cohen, Jobert et coll., 2004.

66- Tokunaga et coll., 1999 ; Nakamura et coll., 2000.

67- Burton, Small & Blumstein, 2000.

68- Ishai, Ungerleider, Martin, Schouten & Haxby, 1999 ; Haxby, Ishai, Chao, Ungerleider & Martin, 2000 ; Ishai, Ungerleider, Martin & Haxby, 2000 ; Haxby et coll., 2001 ; Levy, Hasson, Avidan, Hendler & Malach, 2001 ; Hasson et coll., 2002 ; Malach, Levy & Hasson, 2002 ; Hasson, Harel, Levy & Malach, 2003.

69- Puce, Allison, Asgari, Gore & McCarthy, 1996.

70- Haxby et coll., 2001 ; Grill-Spector, Sayres & Ress, 2006.

71- Grill-Spector et coll., 2006.

72- Tsao, Freiwald, Tootell & Livingstone, 2006.

73- Tarkiainen, Helenius, Hansen, Cornelissen & Salmelin, 1999 ; Tarkiainen, Cornelissen & Salmelin, 2002.

74- Allison, McCarthy, Nobre, Puce & Belger, 1994 ; Nobre, Allison & McCarthy, 1994 ; Allison, Puce, Spencer & McCarthy, 1999. Voir également Gaillard et coll., 2006.

75- Kanwisher, McDermott & Chun, 1997.

76- Cohen et coll., 2000.

77- McCandliss, Curran & Posner, 1993.

78- Cohen et coll., 2000 ; Molko et coll., 2002.

79- Ellis et coll., 1988 ; Cohen et coll., 2000 ; Ellis, 2004. Le transfert inter-hémisphérique n'est qu'un des facteurs qui contribue à l'avantage de l'hémichamp droit pour la lecture (voir Brysbaert, 1994). Le sens de la lecture, de gauche à droite dans nos pays, joue également un rôle important car il conduit à donner un entraînement particulier à la reconnaissance visuelle des lettres dans l'hémichamp droit (Nazir, Ben-Boutayab, Decoppet, Deutsch & Frost, 2004).

80- Molko et coll., 2002.

81- Le Bihan, Urayama, Aso, Hanakawa & Fukuyama, 2006.

82- Polk & Farah, 2002.

83- Grill-Spector & Malach, 2001 ; Naccache & Dehaene, 2001.

84- Dehaene et coll., 2001.

85- Dehaene et coll., 2004.

86- Devlin, Jamison, Matthews & Gonnerman, 2004.

87- Le livre *Le Nouvel Inconscient* de Lionel Naccache fournit une excellente introduction aux données les plus récentes sur l'étendue des processus subliminaux dans le cerveau.

88- Dehaene et coll., 2004.

89- Voir par exemple Price, Wise & Frackowiak, 1996 ; Büchel, Price & Friston, 1998 ; Cohen et coll., 2002 ; Dehaene et coll., 2002 ; Polk & Farah, 2002. Tous ces articles ont montré que la région visuelle ventrale s'active moins en présence de chaînes de consonnes que de mots ou de pseudo-mots. Ce résultat s'obtient aisément tant que les participants effectuent une tâche simple, par exemple détecter la présence d'une lettre descendante comme p ou g, ou tout simplement regarder passivement les stimuli. Il est crucial, toutefois, de ne pas demander aux participants d'effectuer une tâche difficile, telle que de mémoriser les stimuli ou d'en détecter la répétition. Dans ce cas, la tâche est souvent plus difficile pour les chaînes de consonnes que pour les mots, et le résultat peut s'inverser (voir par exemple Tagamets, Novick, Chalmers & Friedman, 2000).

90- Polk et coll., 2002.

91- Dehaene, 1995 ; Bentin, Mouchetant-Rostaing, Giard, Echallier & Pernier, 1999 ; Tarkiainen et coll., 1999 ; Pinel, Dehaene, Riviere & LeBihan, 2001.

92- Voir Tan et coll., 2000 ; Kuo et coll., 2001 ; Kuo et coll., 2003 ; Lee et coll., 2004. Toutefois, en comparaison avec la lecture de l'anglais, quelques autres régions, dont le lobe pariétal droit et la région frontale moyenne gauche, s'activent plus lors de la lecture de caractères chinois (Tan et coll., 2001 ; Siok, Perfetti, Jin & Tan, 2004). Ces régions interviennent dans l'attention visuo-spatiale et la motricité, qui pourrait jouer un rôle plus important en chinois où le lecteur retrace mentalement la configuration spatiale des caractères.

93- Chen, Fu, Iversen, Smith & Matthews, 2002 ; Fu, Chen, Smith, Iversen & Matthews, 2002. Selon les études, on voit parfois un peu plus d'activité pour les caractères chinois, sans doute parce qu'ils font l'objet d'un plus long apprentissage et deviennent plus familiers que l'écriture pinyin.

94- Kuo et coll., 2001.

95- Ding, Peng & Taft, 2004.

96- Nakamura, Dehaene, Jobert, Le Bihan & Kouider, 2005. Voir également Ha Duy Thuy et coll., 2004, et en magnéto-encéphalographie, Koyama, Kakigi, Hoshiyama & Kitamura, 1998. La lecture a également été étudiée en coréen, avec des résultats similaires (Lee, 2004).

97- Sakurai, Takeuchi et coll., 2000.

98- Sasanuma, 1975 ; Sakurai, Momose et coll., 2000 ; Sakurai, Takeuchi et coll., 2000 ; Sakurai, Ichikawa & Mannen, 2001.

99- Catani, Jones, Donato & Ffytche, 2003.

100- Di Virgilio & Clarke, 1997.

101- Marinkovic et coll., 2003 ; voir également Pammer et coll., 2004, pour des données globalement similaires, mais qui suggèrent toutefois une extension précoce et soudaine de l'activité à la région frontale inférieure de l'hémisphère gauche.

102- Fiez, Balota, Raichle & Petersen, 1999 ; Hagoort et coll., 1999 ; Tagamets et coll., 2000 ; Bokde, Tagamets, Friedman & Horwitz, 2001 ; Xu et coll., 2001 ; Cohen et coll., 2002 ; Fiebach, Friederici, Muller & von Cramon, 2002 ; Simos, Breier et coll., 2002 ; Binder et coll., 2003.

103- Pugh et coll., 1996 ; Price, Moore, Humphreys & Wise, 1997 ; Friederici, Opitz & von Cramon, 2000 ; Booth et coll., 2002 ; Cohen, Jobert et coll., 2004.

104- Pour des revue des travaux récents, voir Fiez & Petersen, 1998 ; Price, 1998 ; Jobard, Crivello & Tzourio-Mazoyer, 2003 ; Mechelli, Gorno-Tempini & Price, 2003 ; Price et coll., 2003.

105- Van Atteveldt, Formisano, Goebel & Blomert, 2004.

106- Raij, Uutela & Hari, 2000.

107- Dehaene-Lambertz & Dehaene, 1994 ; Dehaene-Lambertz & Baillet, 1998 ; Dehaene-Lambertz, Dehaene & Hertz-Pannier, 2002.

108- Dehaene-Lambertz, 1997 ; Naatanen et coll., 1997 ; Cheour et coll., 1998 ; Jacquemot, Pallier, LeBihan, Dehaene & Dupoux, 2003.

109- Simon, Mangin, Cohen, Le Bihan & Dehaene, 2002.

110- Paulesu, Frith & Frackowiak, 1993.

111- Binder et coll., 1999 ; Binder et coll., 2000 ; Kotz, Cappa, von Cramon & Friederici, 2002.

112- Vandenberghe, Price, Wise, Josephs & Frackowiak, 1996.

113- Binder et coll., 1999 ; Cohen et coll., 2003.

114- Devlin et coll., 2004.

115- Nakamura et coll., 2005.

116- Rissman, Eliassen & Blumstein, 2003.

117- Mazoyer et coll., 1993 ; Price et coll., 1997 ; Vandenberghe, Nobre & Price, 2002.

118- Thompson-Schill, D'Esposito & Kan, 1999 ; Rodd, Davis & Johnsrude, 2005.

119- Damasio, 1989b, 1989a.

120- Warrington & Shallice, 1984 ; Caramazza & Hillis, 1991 ; Caramazza, 1996, 1998 ; Shelton, Fouch & Caramazza, 1998.

121- Damasio, Grabowski, Tranel, Hichwa & Damasio, 1996 ; Grabowski, Damasio & Damasio, 1998.

122- Martin, Wiggs, Ungerleider & Haxby, 1996 ; Chao, Haxby & Martin, 1999 ; Beauchamp, Lee, Argall & Martin, 2004.

123- Pulvermuller, 2005.

124- Dehaene, 1995.

125- Wydell & Butterworth, 1999.

126- Chen et coll., 2002 ; Fu et coll., 2002.

127- Paulesu et coll., 2000.

128- Klüver & Bucy, 1937.

129- Mishkin & Pribram, 1954.

130- Lissauer, 1890 ; Goodale & Milner, 1992.

131- Humphrey & Weiskrantz, 1969 ; Weiskrantz & Saunders, 1984.

132- Desimone & Gross, 1979 ; Schwartz, Desimone, Albright & Gross, 1983 ; Perrett, Mistlin & Chitty, 1989 ; Tanaka, 1996 ; Tamura & Tanaka, 2001 ; Tanaka, 2003.

133- Sary, Vogels & Orban, 1993 ; Ito, Tamura, Fujita & Tanaka, 1995.

134- Vogels & Biederman, 2002.

135- Tanaka, 2003.

136- Logothetis, Pauls & Poggio, 1995 ; Booth & Rolls, 1998.

137- Quiroga, Reddy, Kreiman, Koch & Fried, 2005.

138- Rolls, 2000.

139- Grill-Spector et coll., 1998 ; Lerner, Hendler, Ben-Bashat, Harel & Malach, 2001 ; Vuilleumier, Henson, Driver & Dolan, 2002.

140- Thorpe, Fize & Marlot, 1996.

141- Riesenhuber & Poggio, 1999 ; Van Rullen & Thorpe, 2002.

142- Tanaka, 2003.

143- Tsunoda, Yamane, Nishizaki & Tanifuji, 2001.

144- Ito & Komatsu, 2004.

145- Brincat & Connor, 2004.

146- Biederman, 1987.

147- Biederman, 1987.

148- Biederman & Bar, 1999.

149- Vogels, Biederman, Bar & Lorincz, 2001.

150- Miyashita, 1988 ; Logothetis et coll., 1995.

151- Baker, Behrmann & Olson, 2002.

152- Gould & Marler, 1987.

153- Miyashita, 1988 ; Sakai & Miyashita, 1991.

154- Gould & Vrba, 1982.

155- Jacob, 1977.

156- Dawkins, 1989.

157- Blackmore, 1999.

158- Sperber, 1996 ; Sperber & Hirschfeld, 2004.

159- Dehaene et coll., 2005. Ce modèle généralise certaines hypothèses proposées pour la première fois par Mozer, 1987. dans le cadre d’une simulation informatique explicite.

160- Hubel & Wiesel, 1970.

161- Sigman & Gilbert, 2000 ; Sigman et coll., 2005.

162- Une région proche de l'aire V4 est activée par les chaînes de lettres, plus que par les damiers, les visages ou les maisons, particulièrement dans l'hémisphère gauche lorsque les mots sont présentés à droite ; voir Cohen et coll., 2000 ; Cohen et coll., 2002 ; Hasson et coll., 2002, et la figure 3.11.

163- Whitney, 2001 ; Grainger & Whitney, 2004 ; Schoonbaert & Grainger, 2004.

164- Humphreys, Evett & Quinlan, 1990 ; Peressotti & Grainger, 1999.

165- Perea & Lupker, 2003 ; Schoonbaert & Grainger, 2004. La lecture des mots dont les lettres ont été mélangées a fait l'objet de nombreuses rumeurs circulant sur l'Internet. Pour une discussion approfondie, voir le site du psychologue Matt Davis à l'Université de Cambridge : http://www.mrc-cbu.cam.ac.uk/~mattd/Cmabridge/

166- McClelland & Rumelhart, 1981 ; Grainger & Jacobs, 1996 ; Ans et coll., 1998 ; Zorzi et coll., 1998 ; Harm & Seidenberg, 1999 ; Coltheart et coll., 2001 ; Perry et coll., 2007.

167- Vinckier et coll., 2006.

168- Rastle et coll., 2000 ; Longtin et coll., 2003.

169- Reicher, 1969 ; Spoehr & Smith, 1975 ; Rumelhart & McClelland, 1982.

170- Bouma, 1973 ; Lavidor et coll., 2001 ; Nazir et coll., 2004 ; Vinckier et coll., 2006.

171- Dehaene et coll., 2004.

172- Allison et coll., 1994 ; Allison et coll., 1999 ; Haxby et coll., 2001 ; Grill-Spector et coll., 2006.

173- Binder, Medler, Westbury, Liebenthal & Buchanan, 2006.

174- Cohen et coll., 2002.

175- Ding et coll., 2004.

176- Ziegler & Goswami, 2005.

177- Paulesu et coll., 2000.

178- Ha Duy Thuy et coll., 2004 ; Nakamura et coll., 2005.

179- Quartz & Sejnowski, 1997.

180- Levy et coll., 2001 ; Hasson et coll., 2002 ; Malach et coll., 2002.

181- Turing, 1952.

182- Grill-Spector et coll., 1998 ; Lerner et coll., 2001.

183- Dehaene et coll., 2004.

184- Voir par exemple Kitterle & Selig, 1991 ; Robertson & Lamb, 1991.

185- Cohen, Lehericy et coll., 2004.

186- Turkeltaub et coll., 2004.

187- Cohen et coll., 2003.

188- Kipling, 1961.

189- Lévi-Strauss, 1958 ; Sperber, 1974 ; Chomsky, 1988 ; Brown, 1991.

190- La notation coréenne *hangûl*, par exemple, utilise une combinatoire de signes pour dénoter des traits phonétiques tels que la vibration des cordes vocales dans les consonnes.

191- Changizi & Shimojo, 2005.

192- Changizi, Zhang, Ye & Shimojo, 2006.

193- Il ne fait aucun doute que la simplicité du geste moteur a également exercé une forte pression sélective sur l'évolution de l'écriture. Toutefois, plusieurs arguments suggèrent que les régularités identifiées par Changizi sont plus liées à la facilité de la lecture qu'à celle de l'écriture (Changizi & Shimojo, 2005 ; Changizi et coll., 2006). En particulier, on retrouve ces régularités dans les polices de caractères informatiques, ainsi que dans les logos des entreprises, deux types de symboles pour lesquels la difficulté de l'écriture n'entre pas en jeu. Inversement, la forme visuelle de l'écriture manuscrite fait intervenir des courbes qualitativement différentes.

194- Leroi-Gourhan, 1983 ; Calvet, 1998.

195- Leroi-Gourhan, 1964, p. 266, 268, et 280.

196- Schmandt-Besserat, 1996.

197- L'imagerie cérébrale a récemment démontré que la vision d'une configuration du corps active une région particulière du cortex occipital (Downing, Jiang, Shuman & Kanwisher, 2001).

198- Plotin, *Cinquième Ennéade*, Livre 6, paragraphe 6.

199- DeFrancis, 1989.

200- Coulmas, 1989, p. 78.

201- Zali & Berthier, 1997, p. 38.

202- Une occasion similaire se présenta en Corée lorsque le roi Sejong exprima son mécontentement des caractères chinois, qu'il jugeait inaptes à noter la langue coréenne. « Ce système est trop compliqué, imparfait, et malcommode pour que le peuple coréen exprime librement ses idées et ses pensées propres, parce que trop de caractères chinois y sont utilisés. Les Coréens ont grand besoin de leurs propres lettres, avec lesquelles ils puissent écrire la langue coréenne. » C'est ainsi qu'en 1446, « par compassion pour le peuple », Sejong promulgua l'écriture hangûl, dont 24 des 28 caractères sont toujours en usage aujourd'hui. Son usage rationnel des principes de notation phonétique, alphabétique et syllabique en fait l'un des systèmes d'écriture les plus élégants de la planète (Coulmas, 1989, p. 118-122).

203- Coulmas, 1989, p. 146.

204- Pour d'excellentes revues du développement de la lecture et des implications pour son enseignement, voir Rayner & Pollatsek, 1989 ; Ehri, Nunes, Stahl & Willows, 2001 ; Rayner, Foorman, Perfetti, Pesetsky & Seidenberg, 2001 ; et, en français, Bonin, Fayol & Peereman, 1998.

205- Eimas, Siqueland, Jusczyk & Vigorito, 1971 ; Werker & Tees, 1984 ; Kuhl, 2004.

206- Mehler et coll., 1988.

207- Dehaene-Lambertz & Dehaene, 1994 ; Cheour et coll., 1998 ; Dehaene-Lambertz et coll., 2002 ; Pena et coll., 2003.

208- Kuhl, 2004.

209- Saffran, Aslin & Newport, 1996 ; Marcus, Vijayan, Bandi Rao & Vishton, 1999 ; Altmann, 2002 ; Marcus & Berent, 2003.

210- Chomsky, 1980.

211- Pascalis & de Schonen, 1994 ; Tzourio-Mazoyer et coll., 2002 ; de Haan, Johnson & Halit, 2003.

212- Pascalis, de Haan & Nelson, 2002 ; Pascalis et coll., 2005.

213- Robinson & Pascalis, 2004.

214- Gathers, Bhatt, Corbly, Farley & Joseph, 2004.

215- Frith, 1985.

216- Seidenberg & McClelland, 1989 ; Hutzler, Ziegler, Perry, Wimmer & Zorzi, 2004.

217- Goswami 1986. a montré que certains enfants anglais, dès 5 ans, découvrent spontanément des analogies dans la structure interne des mots. Après avoir lu le mot « beak », ils parviennent à exploiter cette compétence pour lire d'autres mots comme « bean » ou « peak ». Toutefois, l'importance de ces résultats est contestée (Nation, Allen & Hulme, 2001). Il semble que

seul l'enseignement explicite des correspondances graphème-phonème permette à l'enfant de comprendre rapidement l'organisation de l'écriture.

218- Morais, Cary, Alegria & Bertelson, 1979 ; Morais, Bertelson, Cary & Alegria, 1986.

219- Mann, 1986 ; Read, Zhang, Nie & Ding, 1986 ; Cheung & Chen, 2004.

220- Rayner & Pollatsek, 1989 ; Rayner et coll., 2001.

221- Castles & Coltheart, 2004.

222- Ehri & Wilce, 1980.

223- Stuart, 1990 ; l'exemple original consiste à enlever le son « n » de mots comme « bind ».

224- Ou, inversement, écrira « fam » lorsqu'on lui dicte le mot *femme*. Le développement de l'écriture suit des étapes parallèles à celui de la lecture, bien que certaines langues, dont le français, soient plus irrégulières dans leur écriture (passage du son à l'écrit) que dans leur lecture (passage de l'écrit au son). Voir Pacton, Perruchet, Fayol & Cleeremans, 2001 ; Martinet, Valdois & Fayol, 2004.

225- En français, les effets de régularité et de complexité syllabique ont été bien étudiés par Liliane Sprenger-Charolles et ses collaborateurs (Sprenger-Charolles & Siegel, 1997 ; Sprenger-Charolles, Siegel & Bonnet, 1998).

226- Aghababian & Nazir, 2000 ; Zoccolotti et coll., 2005.

227- Voir par exemple le site Internet *www.mrisafety.com*.

228- Gaillard, Balsamo, Ibrahim, Sachs & Xu, 2003.

229- Shaywitz et coll., 2002.

230- Turkeltaub, Gareau, Flowers, Zeffiro & Eden, 2003.

231- Orton, 1925, p. 608.

232- Simos et coll., 2001 ; Maurer, Brem, Bucher & Brandeis, 2005.

233- Parviainen, Helenius, Poskiparta, Niemi & Salmelin, 2006.

234- Posner & McCandliss, 1999 ; McCandliss, Cohen & Dehaene, 2003.

235- Turkeltaub et coll., 2003.

236- Castro-Caldas, Petersson, Reis, Stone-Elander & Ingvar, 1998.

237- Castro-Caldas et coll., 1999.

238- Nieder, Diester & Tudusciuc, 2006.

239- Kolinsky, Morais, Content & Cary, 1987 ; Kolinsky, Morais & Verhaeghe, 1994.

240- Gauthier, Tarr, Anderson, Skudlarski & Gore, 1999 ; Gauthier, Skudlarski, Gore & Anderson, 2000 ; Wong, Gauthier, Woroch, DeBuse & Curran, 2005.

241- Michael Tarr et Isabel Gauthier (2000) proposent de remplacer le nom traditionnel de la région qui répond aux visages (FFA pour *fusiform face area*, en référence à sa localisation dans la région « fusiforme » du cortex occipito-temporal) par celui de *flexible fusiform area*. Toutefois, loin d'être aisément modifiable, il semble bien que cette région contienne une majorité de neurones spécialisés pour les visages (Tsao et coll., 2006).

242- Gauthier, Curran, Curby & Collins, 2003 ; Rossion, Kung & Tarr, 2004.

243- Marks, 1978 ; Cytowic, 1998 ; Ramachandran & Hubbard, 2001b.

244- Dehaene, 1997.

245- Ramachandran & Hubbard, 2001a ; Hubbard, Arman, Ramachandran & Boynton, 2005.

246- Dehaene, 1997, chapitre 3.

247- Hubbard et coll., 2005 ; voir également Sperling, Prvulovic, Linden, Singer & Stirn, 2006.

248- Ramachandran & Hubbard, 2001b.

249- Mondloch & Maurer, 2004 ; Maurer, Pathman & Mondloch, 2006.

250- National Institute of Child Health and Human Development, 2000 ; Rayner et coll., 2001.

251- Centre national de documentation pédagogique, 2002.

252- Bellenger, 1980.

253- Larson, 2004.

254- Pelli, Farell & Moore, 2003.

255- Ahissar & Hochstein, 2004.

256- Paap et coll., 1984.

257- Yoncheva, Blau, Maurer & McCandliss, 2006.

258- Rayner et coll., 2001 ; Bitan & Karni, 2003.

259- Share, 1995, 1999.

260- Braibant & Gérard, 1996 ; Goigoux, 2000 ; Ehri, Nunes, Stahl et coll., 2001 ; Ehri, Nunes, Willows et coll., 2001.

261- Seymour, Aro & Erskine, 2003.

262- Voir le chapitre 2, page 106.

263- Churchill, 1930.

264- Source : Expertise collective de l'INSERM sur les *Troubles spécifiques des apprentissages*, 2007.

265- Shaywitz, Escobar, Shaywitz, Fletcher & Makuch, 1992.

266- Ramus, 2003 ; Vellutino, Fletcher, Snowling & Scanlon, 2004.

267- Zoccolotti et coll., 2005.

268- Cette découverte, qui date de la fin des années 1970 (voir par exemple Liberman, Shankweiler, Orlando, Harris & Berti, 1971 ; Bradley & Bryant, 1978 ; Fischer, Liberman & Shankweiler, 1978 ; Bradley & Bryant, 1983), a été maintes fois répliquée et étendue. Pour des références détaillées, voir les ouvrages généraux cités en référence.

269- Castles & Coltheart, 2004.

270- Leppanen et coll., 2002 ; Richardson, Leppanen, Leiwo & Lyytinen, 2003 ; voir également Benasich & Tallal, 2002 ; Maurer, Bucher, Brem & Brandeis, 2003.

271- Voir par exemple Breier et coll., 2003 ; Breier, Fletcher, Denton & Gray, 2004.

272- Ahissar, Protopapas, Reid & Merzenich, 2000 ; Temple et coll., 2000 ; Breier et coll., 2001 ; Cestnick, 2001 ; Breier, Gray, Fletcher, Foorman & Klaas, 2002.

273- Eden et coll., 1996 ; Demb, Boynton & Heeger, 1997 ; Demb, Boynton, Best & Heeger, 1998 ; Demb, Boynton & Heeger, 1998.

274- Kujala et coll., 2001.

275- Le fait que le groupe de contrôle semble n'avoir reçu aucun entraînement particulier pose problème, car il se pourrait que les enfants n'aient progressé qu'en raison de l'attention et de l'entraînement à l'ordinateur qu'ils recevaient. Pour s'assurer que l'association abstraite de sons et d'images profite bien aux enfants dyslexiques, il faudrait répliquer cette étude avec un plan expérimental plus rigoureux.

276- Voir la revue récente de Tallal & Gaab, 2006.

277- Pour un aperçu du débat et de ses enjeux, voir Ramus, 2003 ; Tallal & Gaab, 2006.

278- Nicolson, Fawcett & Dean, 2001. Des anomalies anatomiques du cervelet ont effectivement été observées dans certaines études de groupe d'enfants dyslexiques (Eckert et coll., 2003 ; Brambati et coll., 2004). Il faut toutefois noter que la théorie cérébelleuse n'est pas nécessairement en conflit avec l'hypothèse phonologique de la dyslexie. En effet, même si son rôle reste sous-étudié, le cervelet, véritable « petit cerveau » dans le cerveau, est connecté à virtuellement toutes les grandes régions corticales et contribue à pratiquement toutes les fonctions cognitives, y compris le traitement de la parole, de la phonologie, et du langage écrit.

279- Galaburda & Livingstone, 1993 ; Demb et coll., 1997 ; Demb, Boynton, Best et coll., 1998 ; Demb, Boynton & Heeger, 1998 ; Stein, 2001.

280- Ramus, Pidgeon & Frith, 2003.

281- Ramus, Rosen et coll., 2003 ; White et coll., 2006. Pour une exposition claire d' une théorie des origines visuelles de la dyslexie, voir Valdois, Bosse & Tainturier, 2004.

282- Paulesu et coll., 2001.

283- Siok et coll., 2004.

284- En accord avec ces hypothèses, il existe au moins un cas bien documenté d'un enfant bilingue, né au Japon de parents anglophones, qui a appris sans difficulté à lire le japonais, en caractères kana comme en kanji, mais qui souffre d'une grave dyslexie en anglais (Wydell & Butterworth, 1999).

285- Shaywitz et coll., 1998 ; Brunswick, McCrory, Price, Frith & Frith, 1999 ; Georgiewa et coll., 1999 ; Temple et coll., 2001 ; Georgiewa et coll., 2002 ; Shaywitz et coll., 2002 ; McCrory, Mechelli, Frith & Price, 2005.

286- Shaywitz et coll., 1998 ; Georgiewa et coll., 1999 ; Georgiewa et coll., 2002.

287- Salmelin, Service, Kiesila, Uutela & Salonen, 1996 ; Helenius, Tarkiainen, Cornelissen, Hansen & Salmelin, 1999.

288- Zoccolotti et coll., 2005.

289- Simos, Breier, Fletcher, Bergman & Papanicolaou, 2000 ; Simos, Fletcher et coll., 2002.

290- Pour des revues récentes, voir Habib, 2000 ; Ramus, 2004 ; Fisher & Francks, 2006.

291- Silani et coll., 2005 ; pour des résultats partiellement similaires, voir Vinckenbosch, Robichon & Eliez, 2005 ; Brown et coll., 2001 ; Brambati et coll., 2004. Même si j'insiste sur ces anomalies du lobe temporal, je ne voudrais pas cacher que la littérature sur les anomalies anatomiques dans la dyslexie demeure d'une grande complexité dans la mesure où une variété d'autres anomalies, pas toujours répliquées d'une étude à l'autre, ont été décrites : asymétries du lobe temporal et du cervelet, diminution de la matière grise dans la région frontale inférieure gauche, le lobule pariétal inférieur, et le cervelet droit… (voir par exemple Brown et coll., 2001 ; Eckert et coll., 2003 ; Eckert, 2004). Je partage l'avis d'Eraldo Paulesu lorsqu'il affirme, avec G. Silani, que ces observations « sont vraisemblablement pertinentes pour la dyslexie en tant que syndrome neurologique et pour caractériser la variété des pathologies sous-jacentes, mais peut-être moins instructives sur la nature des anomalies morphologiques qui appartiennent au noyau du déficit neuropsychologique de la dyslexie ».

292- Galaburda, Sherman, Rosen, Aboitiz & Geschwind, 1985.

293- Klingberg et coll., 2000 ; Beaulieu et coll., ; Deutsch et coll., 2005 ; Silani et coll., 2005 ; Niogi & McCandliss, 2006.

294- Paulesu et coll., 1996.

295- Galaburda, Menard & Rosen, 1994.

296- Ramus, 2004.

297- Pour un aperçu de cette belle enquête génétique, voir Grigorenko, 2003 ; Fisher & Francks, 2006 ; Galaburda, LoTurco, Ramus, Fitch & Rosen, 2006.

298- Meng et coll., 2005 ; Paracchini et coll., 2006.

299- Voir par exemple Torgesen, 2005.

300- Kilgard & Merzenich, 1998.

301- Merzenich et coll., 1996.

302- Kujala et coll., 2001 ; Simos, Fletcher et coll., 2002 ; Temple et coll., 2003 ; Eden et coll., 2004.

303- Cornell, 1985 ; McMonnies, 1992 ; Wolff & Melngailis, 1996.

304- Corballis, Macadie, Crotty & Beale, 1985 ; Wolff & Melngailis, 1996 ; Terepocki, Kruk & Willows, 2002 ; Lachmann & Geyer, 2003.

305- Corballis & Beale, 1976.

306- Beale, Williams, Webster & Corballis, 1972.

307- Tarr & Pinker, 1989.

308- Biederman & Cooper, 1991 ; Fiser & Biederman, 2001.

309- Foster & Kahn, 1985 ; Dill & Fahle, 1998.

310- Corballis & Beale, 1976.

311- Rollenhagen & Olson, 2000.

312- Orton, 1925, 1937.

313- Corballis & Beale, 1976, 1993.

314- Il est tentant d'envisager ici un rôle possible pour le gène ROBO1, qui est impliqué dans la dyslexie (Hannula-Jouppi et coll., 2005) et qui régule le cheminement des axones d'un côté à l'autre du système nerveux.

315- Rollenhagen & Olson, 2000 ; Baylis & Driver, 2001.

316- Logothetis et coll., 1995.

317- Perrett et coll., 1989.

318- Rodman, Scalaidhe & Gross, 1993.

319- Bornstein, Gross & Wolf, 1978.

320- Sasaki, Vanduffel, Knutsen, Tyler & Tootell, 2005.

321- Mello, 1965, 1966, 1967.

322- Abel, O'Brien & Olavarria, 2000 ; Houzel, Carvalho & Lent, 2002 ; Olavarria & Hiroi, 2003.

323- Voir Olavarria & Hiroi, 2003, et les références qui s'y trouvent.

324- Voir notamment Ungerleider & Mishkin, 1982 ; Goodale & Milner, 1992.

325- Au sujet de cette dissociation entre l'action et la reconnaissance des objets, voir le remarquable cas décrit par Laurent Cohen dans *L'Homme thermomètre*, 2004.

326- Turnbull, 1997 ; Turnbull, Beschin & Della Sala, 1997.

327- Walsh & Butler, 1996.

328- Turnbull & McCarthy, 1996.

329- Davidoff & Warrington, 2001 ; Priftis, Rusconi, Umilta & Zorzi, 2003 ; voir aussi Feinberg & Jones, 1985 ; Riddoch & Humphreys, 1988 ; Davidoff & Warrington, 1999 ; Warrington & Davidoff, 2000.

330- Danziger & Pederson, 1998.

331- Gottfried, Sancar & Chatterjee, 2003.

332- Streifler & Hofman, 1976 ; Heilman, Howell, Valenstein & Rothi, 1980 ; Wade & Hart, 1991 ; Lambon-Ralph, Jarvis & Ellis, 1997.

333- Lambon-Ralph et coll., 1997.

334- Streifler & Hofman, 1976.

335- Wolff & Melngailis, 1996.

336- Liberman et coll., 1971 ; Fischer et coll., 1978 ; Wolff & Melngailis, 1996.

337- McCloskey et coll., 1995 ; McCloskey & Rapp, 2000.

338- Galaburda & Livingstone, 1993 ; Demb et coll., 1997 ; Demb, Boynton, Best et coll., 1998 ; Demb, Boynton & Heeger, 1998 ; Stein, 2001.

339- Gentaz, Colé & Bara, 2003.

340- Changeux & Danchin, 1976 ; Changeux, 1983 ; Changeux & Connes, 1989 ; Changeux, 2002.

341- Chomsky, 1986.

342- Sperber, 1974.

343- Brown, 1991.

344- Sperber & Hirschfeld, 2004 ; voir également Atran, Medin & Ross, 2005.

345- Fodor, 1983.

346- Kanwisher et coll., 1997.

347- Atran, 1990 ; Berlin, 1992.

348- Chao et coll., 1999 ; Pouratian, Bookheimer, Rubino, Martin & Toga, 2003.

349- Dehaene, 1997 ; Butterworth, 1999.

350- Pica, Lemer, Izard & Dehaene, 2004 ; Dehaene, Izard, Pica & Spelke, 2006.

351- Nieder & Miller, 2004.

352- Changeux, 1994.

353- Ramachandran, 2005.

354- Zeki, 2000.

355- Wallin, Merker & Brown, 2000.

356- Atran, 2002 ; Boyer, 2002 ; Dennett, 2006.

357- Whiten et coll., 1999 ; Byrne et coll., 2004.

358- Boysen, Berntson & Prentice, 1987 ; Tanaka, Tomonaga & Matsuzawa, 2003.

359- Coqueugniot, Hublin, Veillon, Houet & Jacob, 2004.

360- Logothetis et coll., 1995.

361- Matsuzawa, 1985 ; Washburn & Rumbaugh, 1991 ; Kawai & Matsuzawa, 2000.

362- Iriki, 2005.

363- Tomasello, 2000b, 2000a ; Tomasello, Carpenter, Call, Behne & Moll, 2005.

364- Gergely, Bekkering & Kiraly, 2002.

365- Tomasello, Strosberg & Akhtar, 1996.

366- Van Essen et coll., 2001.

367- Van Essen et coll., 2001 ; Schoenemann, Sheehan & Glotzer, 2005.

368- Elston, Benavides-Piccione & DeFelipe, 2001.

369- Nimchinsky et coll., 1999.

370- Bianchi, 1921.

371- D’après Finger, 1994, p. 19.

372- Dehaene & Changeux, 2005.

373- Raichle et coll., 2001 ; Laufs et coll., 2003 ; Fox, Corbetta, Snyder, Vincent & Raichle, 2006 ; Nir, Hasson, Levy, Yeshurun & Malach, 2006.

374- Laureys, 2005.

375- Pour une hypothèse similaire dans le domaine mathématique, voir Nunez & Lakoff, 2000.

376- Hermer & Spelke, 1996.

377- Voir cependant Gouteux, Thinus-Blanc & Vauclair, 2001.

378- Karmiloff-Smith, 1992.

379- Dehaene, 1997.

380- Mithen, 1996.

381- Anne Fagot-Largeault, conférence au Collège de France, 13 octobre 2006.

382- Voir le chapitre 5, et tout particulièrement page 193 la section intitulée « L’illusion d’une lecture globale ».

Bibliographie

Ouvrages généraux

ANDRÉ-SALVINI B. (1999), *L'ABCdaire des écritures*, Paris, Flammarion.

BERTHIER A., ZALI A. (1997), *L'Aventure des écritures, tome 1, Naissances*, Paris, Bnf.

CAVALLO G. & CHARTIER R. (éds.) (2001), *Histoire de la lecture dans le monde occidental*, Paris, Seuil.

CALVET L.-J. (1998), *Histoire de l'écriture*, Paris, Hachette.

CHANGEUX J.-P. (2002), *L'Homme de vérité*, Paris, Odile Jacob.

CHANGEUX J.-P. (éd.) (2003), *Gènes et cultures*, Paris, Odile Jacob.

COHEN L. (2004), *L'Homme thermomètre*, Paris, Odile Jacob.

COHEN M. & PEIGNOT J. (2005), *Histoire et art de l'écriture*, Paris, Robert Laffont.

COULMAS F. (1989), *The Writing Systems of the World*, Oxford, Blackwell.

CORBALLIS M. C. & BEALE I. L. (1976), *The Psychology of Left and Right*, New York, Erlbaum.

DANSETTE G. & PLAZA M. (2004), *Dyslexie*, Paris, Josette Lyon.

DEFRANCIS J. (1989), *Visible Speech : The diverse oneness of writing systems*, Honolulu, University of Hawai.

ELLIS A. W. (1998), *Lecture, écriture, et dyslexie*, Genève, Delachaux et Niestlé.

FERRAND L. (2001), *Cognition et lecture. Processus de base de la reconnaissance des mots écrits chez l'adulte*, Bruxelles, De Boeck Université.

HABIB M. (2005), *Dyslexie : le cerveau singulier*, Paris, Solal.

JEAN G. (1987), *L'Écriture : mémoire des hommes*, Paris, Gallimard.
MANGUEL A. (1998), *Une histoire de la lecture*, Paris, Actes Sud.
MILES T. R. & MILES E. (1999), *Dyslexia : A hundred years on*, 2e edition, Buckingham, Open University Press.
MITHEN S. (1996), *The Prehistory of the Mind : The Cognitive Origins of Art, Religion and Science*, Londres, Thames & Hudson.
MORAIS J. (1994), *L'Art de lire*, Paris, Odile Jacob.
NACCACHE L. (2006), *Le Nouvel Inconscient*, Paris, Odile Jacob.
POSNER M. I. & RAICHLE M. E. (1998), *L'Esprit en images*, Bruxelles, De Boeck.
RAYNER K., FOORMAN B. R., PERFETTI C. A., PESETSKY D. & SEIDENBERG M. S. (2001), « How psychological science informs the teaching of reading », *Psychol. Science*, *2*, 31-74.
RAYNER K. & POLLATSEK A. (1989), *The Psychology of Reading*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.
ROBINSON A. (1995), *The Story of Writing : Alphabets, Hieroglyphs & Pictograms*, Londres, Thames & Hudson.
SHAYWITZ S. (2003), *Overcoming Dyslexia*, New York, Random House.
SNOWLING M. (2000), *Dyslexia*, Oxford, Blackwell.
SNOWLING M. J. & HULME C. (éds.) (2005), *The Science of Reading : A Handbook*, Oxford, Blackwell.
SPRENGER-CHAROLLES L. & COLÉ P. (2003), *Lecture et dyslexie : Approche cognitive*, Paris, Dunod.

Références détaillées

ABEL P. L., O'BRIEN B. J. & OLAVARRIA J. F. (2000), Organization of callosal linkages in visual area V2 of macaque monkey. *J Comp Neurol*, *428*, 278-293.
AGHABABIAN V. & NAZIR T. A. (2000), Developing normal reading skills : aspects of the visual processes underlying word recognition. *J Exp Child Psychol*, *76*(2), 123-150.
AHISSAR M. & HOCHSTEIN S. (2004), The reverse hierarchy theory of visual perceptual learning. *Trends Cogn Sci*, *8*(10), 457-464.
AHISSAR M., PROTOPAPAS A., REID M. & MERZENICH M. M. (2000), Auditory processing parallels reading abilities in adults. *Proc*

Natl Acad Sci USA, 97(12), 6832-6837.

ALLISON T., McCARTHY G., NOBRE A. C., PUCE A. & BELGER A. (1994), Human extrastriate visual cortex and the perception of faces, words, numbers and colors. *Cerebral Cortex, 5*, 544-554.

ALLISON T., PUCE A., SPENCER D. D. & McCARTHY G. (1999), Electrophysiological studies of human face perception. I : Potentials generated in occipitotemporal cortex by face and non-face stimuli. *Cereb Cortex, 9*(5), 415-430.

ALTMANN G. T. (2002), Statistical learning in infants. *Proc Natl Acad Sci USA, 99*(24), 15250-15251.

ANS B., CARBONNEL S. & VALDOIS S. (1998), A connectionist multiple-trace memory model for polysyllabic word reading. *Psychol Rev, 105*(4), 678-723.

ARGUIN M., FISET S. & BUB D. (2002), Sequential and parallel letter processing in letter-by-letter dyslexia. *Cognitive Neuropsychology, 19*, 535-555.

ATRAN S. (1990), *Cognitive Foundations of Natural History,* Cambridge University Press.

ATRAN S. (2002), *In Gods We Trust : The evolutionary landscape of religion*. New York : Oxford University Press.

ATRAN S., MEDIN D. L. & ROSS N. O. (2005), The cultural mind : environmental decision making and cultural modeling within and across populations. *Psychol Rev, 112*(4), 744-776.

BAKER C., BEHRMANN M. & OLSON C. (2002), Impact of learning on representation of parts and wholes in monkey inferotemporal cortex. *Nat Neurosci, 5*(11), 1210-1216.

BAYLIS G. C. & DRIVER J. (2001), Shape-coding in IT cells generalizes over contrast and mirror reversal, but not figure-ground reversal. *Nat Neurosci, 4*(9), 937-942.

BEALE I. L., WILLIAMS R. J., WEBSTER D. M. & CORBALLIS M. C. (1972), Confusion of mirror images by pigeons and interhemispheric commissures. *Nature, 238*(5363), 348-349.

BEAUCHAMP M. S., LEE K. E., ARGALL B. D. & MARTIN A. (2004), Integration of auditory and visual information about objects in superior temporal sulcus. *Neuron, 41*(5), 809-823.

BEAULIEU C., PLEWES C., PAULSON L. A., ROY D., SNOOK L., CONCHA L. & PHILLIPS L. (2005), Imaging brain connectivity in children with diverse reading ability. *Neuroimage, 25*(4), 1266-1271.

BELLENGER L. (1980), *Les Méthodes de lecture* (2e édition). Paris : Presses Universitaires de France.

BENASICH A. A. & TALLAL P. (2002), Infant discrimination of rapid auditory cues predicts later language impairment. *Behav Brain Res, 136*(1), 31-49.

BENTIN S., MOUCHETANT-ROSTAING Y., GIARD M. H., ECHALLIER J. F. & PERNIER J. (1999), ERP manifestations of processing printed words at different psycholinguistic levels : time course and scalp distribution. *J Cog Neurosci*, (11), 235-260.

BERLIN B. (1992), *Ethnobiological Classification : Principles of categorization of plants and animals in traditional societies.* Princeton University Press.

BESNER D. (1989), On the role of outline shape and word-specific visual pattern in the identification of function words : NONE. *Q J Exp Psychol A, 41*, 91-105.

BIANCHI L. (1921), *La Mécanique du cerveau et la fonction des lobes frontaux*. Paris : Louis Arnette.

BIEDERMAN I. (1987), Recognition-by-components : a theory of human image understanding. *Psychol Rev, 94*(2), 115-147.

BIEDERMAN I. & BAR M. (1999), One-shot viewpoint invariance in matching novel objects. *Vision Res, 39*(17), 2885-2899.

BIEDERMAN I. & COOPER E. E. (1991), Evidence for complete translational and reflectional invariance in visual object priming. *Perception, 20*(5), 585-593.

BINDER J. R., FROST J. A., HAMMEKE T. A., BELLGOWAN P. S., RAO S. M. & COX R. W. (1999), Conceptual processing during the conscious resting state. A functional MRI study. *J Cogn Neurosci, 11*(1), 80-95.

BINDER J. R., FROST J. A., HAMMEKE T. A., BELLGOWAN P. S., SPRINGER J. A., KAUFMAN J. N. & POSSING E. T. (2000), Human temporal lobe activation by speech and nonspeech sounds. *Cereb Cortex, 10*(5), 512-528.

BINDER J. R., McKIERNAN K. A., PARSONS M. E., WESTBURY C. F., POSSING E. T., KAUFMAN J. N. & BUCHANAN L. (2003), Neural correlates of lexical access during visual word recognition. *J Cogn Neurosci, 15*(3), 372-393.

BINDER J. R., MEDLER D. A., WESTBURY C. F., LIEBENTHAL E. & BUCHANAN L. (2006), Tuning of the human left fusiform gyrus to sublexical orthographic structure. *Neuroimage, 33*(2), 739-748.

BINDER J. R. & MOHR J. P. (1992), The topography of callosal reading pathways. A case-control analysis. *Brain, 115*, 1807-1826.

BITAN T. & KARNI A. (2003), Alphabetical knowledge from whole words training : effects of explicit instruction and implicit experience on learning script segmentation. *Brain Res Cogn Brain Res, 16*(3), 323-337.

BLACKMORE S. J. (1999), *The Meme Machine*. Oxford : Oxford University Press.

BOKDE A. L., TAGAMETS M. A., FRIEDMAN R. B. & HORWITZ B. (2001), Functional interactions of the inferior frontal cortex during the processing of words and word-like stimuli. *Neuron, 30*(2), 609-617.

BONIN P., FAYOL M. & PEEREMAN R. (1998), Masked form priming in writing words from pictures : evidence for direct retrieval of orthographic codes. *Acta Psychol (Amst), 99*(3), 311-328.

BOOTH J. R., BURMAN D. D., MEYER J. R., GITELMAN D. R., PARRISH T. B. & MESULAM M. M. (2002), Functional anatomy of intra- and cross-modal lexical tasks. *Neuroimage, 16*(1), 7-22.

BOOTH M. & ROLLS E. (1998), View-invariant representations of familiar objects by neurons in the inferior temporal visual cortex. *Cereb Cortex, 8*(6), 510-523.

BORNSTEIN M. H., GROSS C. G. & WOLF J. Z. (1978), Perceptual similarity of mirror images in infancy. *Cognition, 6*(2), 89-116.

BOUMA H. (1973), Visual interference in the parafoveal recognition of initial and final letters of words. *Vision Res, 13*(4), 767-782.

BOYER P. (2002), *Religion Explained : The Evolutionary Origins of Religious Thought*. New York : Basic books.

BOYSEN S. T., BERNTSON G. G. & PRENTICE J. (1987), Simian scribbles : a reappraisal of drawing in the chimpanzee (Pan troglodytes). *J Comp Psychol, 101*(1), 82-89.

BRADLEY L. & BRYANT P. (1983), Categorizing sounds and learning to read : A causal connection. *Nature, 30*, 419-421.

BRADLEY L. & BRYANT P. E. (1978), Difficulties in auditory organization as a possible cause of reading backwardness. *Nature, 271*, 746-747.

BRAIBANT J.-M. & GÉRARD F.-M. (1996), Savoir lire : une question de méthodes ? *Bulletin de psychologie scolaire et d'orientation, 1*, 7-45.

BRAMBATI S. M., TERMINE C., RUFFINO M., STELLA G., FAZIO F., CAPPA S. F. & PERANI D. (2004), Regional reductions of gray matter volume in familial dyslexia. *Neurology, 63*(4), 742-745.

BREIER J. I., FLETCHER J. M., DENTON C. & GRAY L. C. (2004), Categorical perception of speech stimuli in children at risk for reading difficulty. *J Exp Child Psychol, 88*(2), 152-170.

BREIER J. I., GRAY L., FLETCHER J. M., DIEHL R. L., KLAAS P., FOORMAN B. R. & MOLIS M. R. (2001), Perception of voice and tone onset time continua in children with dyslexia with and without attention deficit/hyperactivity disorder. *J Exp Child Psychol, 80*(3), 245-270.

BREIER J. I., GRAY L. C., FlETCHER J. M., FOORMAN B. & KLAAS P. (2002), Perception of speech and nonspeech stimuli by children with and without reading disability and attention deficit hyperactivity disorder. *J Exp Child Psychol, 82*(3), 226-250.

BREIER J. I., SIMOS P. G., FLETCHER J. M., CASTILLO E. M., ZHANG W. & PAPANICOLAOU A. C. (2003), Abnormal activation of temporoparietal language areas during phonetic analysis in children with dyslexia. *Neuropsychology, 17*(4), 610-621.

BRINCAT S. L. & CONNOR C. E. (2004), Underlying principles of visual shape selectivity in posterior inferotemporal cortex. *Nat Neurosci, 7*(8), 880-886.

BROWN D. (1991), *Human Universals*. New York : MCGRAW-HILL.

BROWN W. E., ELIEZ S., MENON V., RUMSEY J. M., WHITE C. D. & REISS A. L. (2001), Preliminary evidence of widespread morphological variations of the brain in dyslexia. *Neurology, 56*(6), 781-783.

BRUNSWICK N., MCCRORY E., PRICE C. J., FRITH C. D. & FRITH U. (1999), Explicit and implicit processing of words and pseudowords by

adult developmental dyslexics : A search for Wernicke's Wortschatz ? *Brain, 122*, 1901-1917.
BRYSBAERT M. (1994), Interhemispheric transfer and the processing of foveally presented stimuli. *Behav Brain Res, 64*(1-2), 151-161.
BÜCHEL C., PRICE C. J. & FRISTON K. (1998), A multimodal language region in the ventral visual pathway. *Nature, 394*(6690), 274-277.
BURTON M. W., SMALL S. L. & BLUMSTEIN S. E. (2000), The role of segmentation in phonological processing : an fMRI investigation. *J Cogn Neurosci, 12*(4), 679-690.
BUTTERWORTH B. (1999), *The Mathematical Brain*. London : Macmillan.
BYRNE R. W., BARNARD P. J., DAVIDSON I., JANIK V. M., MCGREW W. C., MIKLOSI A. & WIESSNER P. (2004), Understanding culture across species. *Trends Cogn Sci, 8*(8), 341-346.
CALVET L.-J. (1998), *Histoire de l'écriture*. Paris : Hachette.
CARAMAZZA A. (1996), The brain's dictionary. *Nature, 380*, 485-486.
CARAMAZZA A. (1998), The interpretation of semantic category-specific deficits : What do they reveal about the organization of conceptual knowledge in the brain ? *NeuroCase, 4*, 265-272.
CARAMAZZA A. & HILLIS A. E. (1991), Lexical representation of nouns and verbs in the brain. *Nature, 349*, 788-790.
CARAMAZZA A., LAUDANNA A. & ROMANI C. (1988), Lexical access and inflectional morphology. *Cognition, 28*, 297-332.
CASTLES A. & COLTHEART M. (2004), Is there a causal link from phonological awareness to success in learning to read ? *Cognition, 91*(1), 77-111.
CASTRO-CALDAS A., MIRANDA P. C., CARMO I., REIS A., LEOTE F., RIBEIRO C. & DUCLA-SOARES E. (1999), Influence of learning to read and write on the morphology of the corpus callosum. *Eur J Neurol, 6*(1), 23-28.
CASTRO-CALDAS A., PETERSSON K. M., REIS A., StONE-ELANDER S. & INGVAR M. (1998), The illiterate brain. Learning to read and write during childhood influences the functional organization of the adult brain. *Brain, 121*(Pt 6), 1053-1063.
CATANI M., JONES D. K., DONATO R. & FFYTCHE D. H. (2003), Occipito-temporal connections in the human brain. *Brain, 126*(Pt 9),

2093-2107.
Centre national de documentation pédagogique. (2002), *Qu'apprend-on à l'école élémentaire ? Les nouveaux programmes (préface de Jack Lang)*. Paris : XO Éditions.
CESTNICK L. (2001), Cross-modality temporal processing deficits in developmental phonological dyslexics. *Brain Cogn*, *46*(3), 319-325.
CHANGEUX J.-P. (1983), *L'Homme neuronal*. Paris : Fayard.
CHANGEUX J.-P. (1994), *Raison et plaisir*. Paris : Odile Jacob.
CHANGEUX J.-P. (2002), *L'Homme de vérité*. Paris : Odile Jacob.
CHANGEUX J.-P. & CONNES A. (1989), *Matière à pensée*. Paris : Odile Jacob.
CHANGEUX J.-P. & DANCHIN A. (1976), Selective stabilization of developing synapses as a mechanism for the specification of neuronal networks. *Nature, 264*, 705-712.
CHANGIZI M. A. & SHIMOJO S. (2005), Character complexity and redundancy in writing systems over human history. *Proc Biol Sci, 272*(1560), 267-275.
CHANGIZI M. A., ZHANG Q., YE H. & SHIMOJO S. (2006), The structures of letters and symbols throughout human history are selected to match those found in objects in natural scenes. *Am Nat, 167*(5), E117-139.
CHAO L. L., HAXBY J. V. & MARTIN A. (1999), Attribute-based neural substrates in temporal cortex for perceiving and knowing about objects. *Nat Neurosc, 2*(10), 913-919.
CHEN Y., FU S., IVERSEN S. D., SMITH S. M. & MATTHEWS P. M. (2002), Testing for dual brain processing routes in reading : a direct contrast of chinese character and pinyin reading using FMRI. *J Cogn Neurosci, 14*(7), 1088-1098.
CHEOUR M., CEPONIENE R., LEHTOKOSKI A., LUUK A., ALLIK J., ALHO K. & NAATANEN R. (1998), Development of language-specific phoneme representations in the infant brain. *Nat Neurosci, 1*(5), 351-353.
CHEUNG H. & CHEN H. C. (2004), Early orthoraphic experience modifies both phonological awareness and on-line speech processing. *Language and Cognitive Processes, 19*, 1-28.

CHOMSKY N. (1980), *Rules and Representations*. Oxford : Basil Blackwell.

CHOMSKY N. (1986), *Knowledge of Language : Its Nature, Origins, and Use*. Westport, CT : Praeger Paperback.

CHOMSKY N. (1988), *Language and the Problems of Knowledge*. Cambridge : MIT Press.

CHURCHILL W. (1930), *My Early Life : A Roving Commission*. London : Thornton Butterworth.

COHEN L. (2004), *L'Homme thermomètre*. Paris : Éditions Odile Jacob.

COHEN L. & DEHAENE S. (1995), Number processing in pure alexia : the effect of hemispheric asymmetries and task demands. *NeuroCase, 1*, 121-137.

COHEN L. & DEHAENE S. (2000), Calculating without reading : unsuspected residual abilities in pure alexia. *Cognitive Neuropsychology, 17*(6), 563-583.

COHEN L. & DEHAENE S. (2004), Specialization within the ventral stream : the case for the visual word form area. *Neuroimage, 22*(1), 466-476.

COHEN L., DEHAENE S., NACCACHE L., LEHÉRICY S., DEHAENE-LAMBERTZ G., HÉNAFF M. A. & MICHEL F. (2000), The visual word form area : Spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain, 123*, 291-307.

COHEN L., HENRY C., DEHAENE S., MARTINAUD O., LEHERICY S., LEMER C. & FERRIEUX S. (2004), The pathophysiology of letter-by-letter reading. *Neuropsychologia, 42*(13), 1768-1780.

COHEN L., JOBERT A., LE BIHAN D. & DEHAENE S. (2004), Distinct unimodal and multimodal regions for word processing in the left temporal cortex. *Neuroimage, 23*(4), 1256-1270.

COHEN L., LEHERICY S., CHOCHON F., LEMER C., RIVAUD S. & DEHAENE S. (2002), Language-specific tuning of visual cortex ? Functional properties of the visual word form area. *Brain, 125*(Pt 5), 1054-1069.

COHEN L., LEHERICY S., HENRY C., BOURGEOIS M., LARROQUE C., SAINTE-ROSE C., DEHAENE S. & HERTZ-PANNIER L. (2004),

Learning to read without a left occipital lobe : right-hemispheric shift of visual word form area. *Ann Neurol, 56*(6), 890-894.

COHEN L., MARTINAUD O., LEMER C., LEHÉRICY S., SAMSON Y., OBADIA M., SLACHEVSKY A. & DEHAENE S. (2003), Visual word recognition in the left and right hemispheres : Anatomical and functional correlates of peripheral alexias. *Cerebral Cortex, 13,* 1313-1333.

COLTHEART M. & COLTHEART V. (1997), Reading comprehension is not exclusively reliant upon phonological representation. *Cognitive Neuropsychology, 14,* 167-175.

COLTHEART M., DAVELAAR E., JONASSON J. T. & BESNER D. (1977), Access to the internal lexicon. *In* S. DORNIC (éd.), *Attention & Performance VI* (pp. 535-555), London : Academic Press.

COLTHEART M., RASTLE K., PERRY C., LANGDON R. & ZIEGLER J. (2001), DRC : a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychol Rev, 108*(1), 204-256.

COQUEUGNIOT H., HUBLIN J. J., VEILLON F., HOUET F. & JACOB T. (2004), Early brain growth in *Homo erectus* and implications for cognitive ability. *Nature, 431*(7006), 299-302.

CORBALLIS M. C. & BEALE I. L. (1976), *The Psychology of Left and Right*. New York : Erlbaum.

CORBALLIS M. C. & BEALE I. L. (1993), Orton revisited : Dyslexia, laterality, and left-right confusion. *In* D. WILLOWS, R. S. KRUK & E. CORCOS (éds.), *Visual Processes in Reading and Reading Disabilities*. Hillsdale, N.J. : Erlbaum.

CORBALLIS M. C., MACADIE L., CROTTY A. & BEALE I. L. (1985), The naming of disoriented letters by normal and reading-disabled children. *J Child Psychol Psychiatry, 26*(6), 929-938.

CORNELL (1985), Spontaneous mirror-writing in children. *Can J Exp Psychol, 39,* 174-179.

COSLETT H. B. & MONSUL N. (1994), Reading with the right hemisphere : Evidence from transcranial magnetic stimulation. *Brain and Language, 46,* 198-211.

COSLETT H. B. & SAFFRAN E. M. (1989), Evidence for preserved reading in ’pure alexia’. *Brain, 112,* 327-359.

COSLETT H. B., SAFFRAN E. M., GREENBAUM S. & SCHWARTZ H. (1993), Reading in pure alexia : the effect of strategy. *Brain, 116*, 21-37.

COULMAS F. (1989), *The Writing Systems of the World*. Oxford : Blackwell.

CYTOWIC R. E. (1998), *The Man who Tasted Shapes*. Cambridge, Mass. : MIT Press.

DAMASIO A. R. (1989a), The brain binds entities and events by multiregional activation from convergence zones. *Neural Computation, 1*, 123-132.

DAMASIO A. R. (1989b), Time-locked multiregional retroactivation : A systems-level proposal for the neural substrates of recall and recognition. *Cognition, 33*, 25-62.

DAMASIO A. R. & DAMASIO H. (1983), The anatomic basis of pure alexia. *Neurology, 33*, 1573-1583.

DAMASIO H., GRABOWSKI T. J., TRANEL D., HICHWA R. D. & DAMASIO A. R. (1996), A neural basis for lexical retrieval. *Nature, 380*(11 April 1996), 499-505.

DANZIGER E. & PEDERSON E. (1998), Through the looking glass : literacy, writing systems and mirror-image discrimination. *Written language and literacy, 1*, 153-167.

DAVIDOFF J. & WARRINGTON E. K. (1999), The bare bones of object recognition : implications from a case of object recognition impairment. *Neuropsychologia, 37*(3), 279-292.

DAVIDOFF J. & WARRINGTON E. K. (2001), A particular difficulty in discriminating between mirror images. *Neuropsychologia, 39*(10), 1022-1036.

DAWKINS R. (1989), *The Selfish Gene*. Oxford : Oxford University Press.

DAWKINS R. (1996), *The Blind Watchmaker : Why the Evidence of Evolution Reveals a Universe Without Design*. New York : W.W. Norton & Co.

DE HAAN M., JOHNSON M. H. & HALIT H. (2003), Development of face-sensitive event-related potentials during infancy : a review. *Int J Psychophysiol, 51*(1), 45-58.

DEFRANCIS J. (1989), *Visible Speech : The Diverse Oneness of Writing Systems*. Honolulu : University of Hawai.

DEHAENE-LAMBERTZ G. (1997), Electrophysiological correlates of categorical phoneme perception in adults. *Neuroreport, 8*(4), 919-924.

DEHAENE-LAMBERTZ G. & BAILLET S. (1998), A phonological representation in the infant brain. *Neuroreport, 9*(8), 1885-1888.

DEHAENE-LAMBERTZ G. & DEHAENE S. (1994), Speed and cerebral correlates of syllable discrimination in infants. *Nature, 370*, 292-295.

DEHAENE-LAMBERTZ G., DEHAENE S. & HERTZ-PANNIER L. (2002), Functional neuroimaging of speech perception in infants. *Science, 298*(5600), 2013-2015.

DEHAENE S. (1995), Electrophysiological evidence for category-specific word processing in the normal human brain. *NeuroReport, 6*, 2153-2157.

DEHAENE S. (1997), *La Bosse des maths*. Paris : Odile Jacob.

DEHAENE S. & CHANGEUX J.-P. (2005), Ongoing spontaneous activity controls access to consciousness : a neuronal model for inattentional blindness. *PLoS Biol, 3*(5), e141.

DEHAENE S., COHEN L., SIGMAN M. & VINCKIER F. (2005), The neural code for written words : a proposal. *Trends Cogn Sci, 9*(7), 335-341.

DEHAENE S., IZARD V., PICA P. & SPELKE E. (2006), Core knowledge of geometry in an Amazonian indigene group. *Science, 311*, 381-384.

DEHAENE S., JOBERT A., NACCACHE L., CIUCIU P., POLINE J. B., LE BIHAN D. & COHEN L. (2004), Letter binding and invariant recognition of masked words : behavioral and neuroimaging evidence. *Psychol Sci, 15*(5), 307-313.

DEHAENE S., LE CLEC'H G., POLINE J. B., LE BIHAN D. & COHEN L. (2002), The visual word form area : a prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus. *Neuroreport, 13*(3), 321-325.

DEHAENE S., NACCACHE L., COHEN L., BIHAN D. L., MANGIN J. F., POLINE J. B. & RIVIERE D. (2001), Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming. *Nat Neurosci, 4*(7), 752-758.

DÉJERINE J. (1892), Contribution à l'étude anatomo-pathologique et clinique des différentes variétés de cécité verbale. *Mémoires de la Société de Biologie, 4*, 61-90.

DEMB J. B., BOYNTON G. M., BEST M. & HEEGER D. J. (1998), Psychophysical evidence for a magnocellular pathway deficit in dyslexia. *Vision Res, 38*(11), 1555-1559.

DEMB J. B., BOYNTON G. M. & HEEGER D. J. (1997), Brain activity in visual cortex predicts individual differences in reading performance. *Proc Natl Acad Sci USA, 94*(24), 13363-13366.

DEMB J. B., BOYNTON G. M. & HEEGER D. J. (1998), Functional magnetic resonance imaging of early visual pathways in dyslexia. *J Neurosci, 18*(17), 6939-6951.

DENNETT D. (1978), *Brainstorms*. Cambridge Mass. : MIT Press.

DENNETT D. (2006), *Breaking the Spell : Religion as a Natural Phenomenon* : Viking.

DESIMONE R. & GROSS C. G. (1979), Visual areas in the temporal cortex of the macaque. *Brain Res, 178*(2-3), 363-380.

DEUTSCH G. K., DOUGHERTY R. F., BAMMER R., SIOK W. T., GABRIELI J. D. & WANDELL B. (2005), Children's reading performance is correlated with white matter structure measured by diffusion tensor imaging. *Cortex, 41*(3), 354-363.

DEVLIN J. T., JAMISON H. L., MATTHEWS P. M. & GONNERMAN L. M. (2004), Morphology and the internal structure of words. *Proc Natl Acad Sci USA, 101*(41), 14984-14988.

DI VIRGILIO G. & CLARKE S. (1997), Direct interhemispheric visual input to human speech areas. *Hum. Brain Mapp., 5*, 347-354.

DILL M. & FAHLE M. (1998), Limited translation invariance of human visual pattern recognition. *Percept Psychophys*, *60*(1), 65-81.

DING G., PENG D. & TAFT M. (2004), The nature of the mental representation of radicals in Chinese : a priming study. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn, 30*(2), 530-539.

DOWNING P. E., JIANG Y., SHUMAN M. & KANWISHER N. (2001), A cortical area selective for visual processing of the human body. *Science, 293*(5539), 2470-2473.

ECKERT M. (2004), Neuroanatomical markers for dyslexia : a review of dyslexia structural imaging studies. *Neuroscientist, 10*(4), 362-371.

ECKERT M. A., LEONARD C. M., RICHARDS T. L., AYLWARD E. H., THOMSON J. & BERNINGER V. W. (2003), Anatomical correlates of dyslexia : frontal and cerebellar findings. *Brain, 126*(Pt 2), 482-494.

EDEN G. F., JONES K. M., CAPPELL K., GAREAU L., WOOD F. B., ZEFFIRO T. A., DIETZ N. A., AGNEW J. A. & FLOWERS D. L. (2004), Neural changes following remediation in adult developmental dyslexia. *Neuron*, *44*(3), 411-422.

EDEN G. F., VANMETER J. W., RUMSEY J. M., MAISOG J. M., WOODS R. P. & ZEFFIRO T. A. (1996), Abnormal processing of visual motion in dyslexia revealed by functional brain imaging. *Nature*, *382*(6586), 66-69.

EHRI L. C., NUNES S. R., STAHL S. A. & WILLOWS D. M. M. (2001), Systematic phonics instruction helps students learn to read : Evidence from the National Reading Panel's meta- analysis. *Review of Educational Research, 71*, 393-447.

EHRI L. C., NUNES S. R., WILLOWS D. M., SCHUSTER B. V., YAGHOUB-ZADEH Z. & SHANAHAN T. (2001), Phonemic awareness instruction helps children learn to read : Evidence from the National Reading Panel's meta-analysis. *Reading Research Quarterly, 36*, 250-287.

EHRI L. C. & WILCE L. S. (1980), The influence of orthography on readers' conceptualisation of the phonemic structure of words. *Applied Psycholinguistics*, *1*, 371-385.

EIMAS P. D., SIQUELAND E. R., JUSCZYK P. W. & VIGORITO J. (1971), Speech perception in infants. *Science*, *171*, 303-306.

ELLIS A. W. (2004), Length, formats, neighbours, hemispheres, and the processing of words presented laterally or at fixation. *Brain Lang*, *88*(3), 355-366.

ELLIS A. W., YOUNG A. W. & ANDERSON C. (1988), Modes of word recognition in the left and right cerebral hemispheres. *Brain Lang*, *35*(2), 254-273.

ELSTON G. N., BENAVIDES-PICCIONE R. & DEFELIPE J. (2001), The pyramidal cell in cognition : a comparative study in human and monkey. *J Neurosci*, *21*(17), RC163.

FEINBERG T. & JONES G. (1985), Object reversals after parietal lobe infarction – a case report. *Cortex*, *21*, 261-271.

FERRAND L. & GRAINGER J. (1992), Phonology and orthography in visual word recognition : evidence from masked non-word priming. *Q. J. Exp. Psychol. [A]*, *45*(3), 353-372.

FERRAND L. & GRAINGER J. (1993), The time course of orthographic and phonological code activation in the early phases of visual word recognition. *Bulletin of the Psychonomic Society, 31*, 119-122.

FERRAND L. & GRAINGER J. (1994), Effects of orthography are independent of phonology in masked form priming. *Q J Exp Psychol [A], 47*(2), 365-382.

FIEBACH C. J., FRIEDERICI A. D., MULLER K. & VON CRAMON D. Y. (2002), fMRI evidence for dual routes to the mental lexicon in visual word recognition. *J Cogn Neurosci, 14*(1), 11-23.

FIEZ J. A., BALOTA D. A., RAICHLE M. E. & PETERSEN S. E. (1999), Effects of lexicality, frequency, and spelling-to-sound consistency on the functional anatomy of reading. *Neuron, 24*(1), 205-218.

FIEZ J. A. & PETERSEN S. E. (1998), Neuroimaging studies of word reading. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 95*(3), 914-921.

FINGER S. (1994), *Origins of Neuroscience : A History of Explorations into Brain Function*. New York : Oxford university press.

FISCHER F. W., LIBERMAN I. Y. & SHANKWEILER D. (1978), Reading reversals and developmental dyslexia : a further study. *Cortex, 14*(4), 496-510.

FISER J. & BIEDERMAN I. (2001), Invariance of long-term visual priming to scale, reflection, translation, and hemisphere. *Vision Res, 41*(2), 221-234.

FISET D., ARGUIN M., BUB D., HUMPHREYS G. W. & RIDDOCH M. J. (2005), How to make the word-length effect disappear in letter-by-letter dyslexia. *Psychol Sci, 16*(7), 535-541.

FISHER S. E. & FRANCKS C. (2006), Genes, cognition and dyslexia : learning to read the genome. *Trends Cogn Sci*.

FODOR J. A. (1983), *The Modularity of Mind*. Cambridge : MIT Press.

FOSTER D. H. & KAHN J. I. (1985), Internal representations and operations in the visual comparison of transformed patterns : effects of pattern point-inversion, position symmetry, and separation. *Biol Cybern, 51*(5), 305-312.

FOX M. D., CORBETTA M., SNYDER A. Z., VINCENT J. L. & RAICHLE M. E. (2006), Spontaneous neuronal activity

distinguishes human dorsal and ventral attention systems. *Proc Natl Acad Sci USA, 103*(26), 10046-10051.

FRIEDERICI A. D., OPITZ B. & VON CRAMON D. Y. (2000), Segregating semantic and syntactic aspects of processing in the human brain : an fMRI investigation of different word types. *Cereb Cortex, 10*(7), 698-705.

FRITH U. (1985), Beneath the surface of developmental dyslexia. *In* K. E. PATTERSON, J. C. MARSHALL & M. COLTHEART (éds.), *Surface Dyslexia : Cognitive and Neuropsychological Studies of Phonological Reading* (pp. 301-330), Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum.

FU S., CHEN Y., SMITH S., IVERSEN S. & MATTHEWS P. M. (2002), Effects of word form on brain processing of written Chinese. *Neuroimage, 17*(3), 1538-1548.

GAGNIÈRE C. (1997), *Pour tout l'or des mots.* Paris : Robert Laffont, collection Bouquins.

GAILLARD R., NACCACHE L., PINEL P., CLEMENCEAU S., VOLLE E., HASBOUN D., DUPONT S., BAULAC M., DEHAENE S., ADAM C. & COHEN L. (2006), Direct intracranial, fMRI, and lesion evidence for the causal role of left inferotemporal cortex in reading. *Neuron, 50*(2), 191-204.

GAILLARD W. D., BALSAMO L. M., IBRAHIM Z., SACHS B. C. & XU B. (2003), fMRI identifies regional specialization of neural networks for reading in young children. *Neurology, 60*(1), 94-100.

GALABURDA A. M. & LIVINGSTONE M. (1993), Evidence for a magnocellular deficit in developmental dyslexia. *In* P. TALLAL, A. M. GALABURDA, R. LLINAS & C. VON EULER (éds.), *Temporal Information Processing in the Nervous System : Special Reference to Dyslexia and Dysphasia* (pp. 70-82), New York : New York Academy of Sciences.

GALABURDA A. M., LOTURCO J., RAMUS F., FITCH R. H. & ROSEN G. D. (2006), From genes to behavior in developmental dyslexia. *Nat Neurosci, 9*(10), 1213-1217.

GALABURDA A. M., MENARD M. T. & ROSEN G. D. (1994), Evidence for aberrant auditory anatomy in developmental dyslexia. *Proc Natl Acad Sci USA, 91*(17), 8010-8013.

GALABURDA A. M., SHERMAN G. F., ROSEN G. D., ABOITIZ F. & GESCHWIND N. (1985), Developmental dyslexia : four consecutive patients with cortical anomalies. *Ann Neurol*, *18*(2), 222-233.

GATHERS A. D., BHATT R., CORBLY C. R., FARLEY A. B. & JOSEPH J. E. (2004), Developmental shifts in cortical loci for face and object recognition. *Neuroreport*, *15*(10), 1549-1553.

GAUTHIER I., CURRAN T., CURBY K. M. & COLLINS D. (2003), Perceptual interference supports a non-modular account of face processing. *Nat Neurosci*, *6*(4), 428-432.

GAUTHIER I., SKUDLARSKI P., GORE J. C. & ANDERSON A. W. (2000), Expertise for cars and birds recruits brain areas involved in face recognition. *Nat Neurosci*, *3*(2), 191-197.

GAUTHIER I., TARR M. J., ANDERSON A. W., SKUDLARSKI P. & GORE J. C. (1999), Activation of the middle fusiform 'face area' increases with expertise in recognizing novel objects. *Nat Neurosci*, *2*(6), 568-573.

GENTAZ E., COLÉ P. & BARA F. (2003), Évaluation d'entraînements multisensoriels de préparation à la lecture pour les enfants en grande section de maternelle : une étude sur la contribution du système haptique manuel. *L'Année Psychologique*, *104*, 561-584.

GEORGIEWA P., RZANNY R., GASER C., GERHARD U. J., VIEWEG U., FREESMEYER D., MENTZEL H. J., KAISER W. A. & BLANZ B. (2002), Phonological processing in dyslexic children : a study combining functional imaging and event related potentials. *Neurosci Lett*, *318*(1), 5-8.

GEORGIEWA P., RZANNY R., HOPF J. M., KNAB R., GLAUCHE V., KAISER W. A. & BLANZ B. (1999), fMRI during word processing in dyslexic and normal reading children. *Neuroreport*, *10*(16), 3459-3465.

GERGELY G., BEKKERING H. & KIRALY I. (2002), Rational imitation in preverbal infants. *Nature*, *415*(6873), 755.

GESCHWIND N. (1965), Disconnection syndromes in animals and man. *Brain*, *88*, 237-294.

GOIGOUX R. (2000), Apprendre à lire à l'école : les limites d'une approche idéovisuelle. *Psychologie Française*, *45*(235-245).

GOODALE M. A. & MILNER A. D. (1992), Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neuroscience, 15*, 20-25.

GOSWAMI U. (1986), Children's use of analogy in learning to read : A developmental study. *Journal of Experimental Child Psychology, 42*, 73-83.

GOTTFRIED J. A., SANCAR F. & CHATTERJEE A. (2003), Acquired mirror writing and reading : evidence for reflected graphemic representations. *Neuropsychologia*, *41*(1), 96-107.

GOULD J. L. & MARLER P. (1987), Learning by instinct. *Scientific American, 62*.

GOULD S. J. (1992), *The Panda's Thumb : More Reflections in Natural History*. New York : W.W. Norton & Co.

GOULD S. J. & VRBA E. S. (1982), Exaptation : A missing term in the science of form. *Paleobiology, 8*(4-15).

GOUTEUX S., THINUS-BLANC C. & VAUCLAIR J. (2001), Rhesus monkeys use geometric and nongeometric information during a reorientation task. *J Exp Psychol Gen, 130*(3), 505-519.

GRABOWSKI T. J., DAMASIO H. & DAMASIO A. R. (1998), Premotor and prefrontal correlates of category-related lexical retrieval. *Neuroimage, 7*(3), 232-243.

GRAINGER J. & JACOBS A. M. (1996), Orthographic processing in visual word recognition : a multiple read-out model. *Psychol Rev, 103*(3), 518-565.

GRAINGER J. & VAN HEUVEN W. (2003), Modeling letter position coding in printed word perception. *In* P. BONIN (éd.), *The Mental Lexicon* (pp. 1-24), New York : Nova Science Publishers.

GRAINGER J. & WHITNEY C. (2004), Does the huamn mnid raed wrods as a wlohe ? *Trends Cogn Sci*, *8*(2), 58-59.

GRAINGER J. & ZIEGLER J. (2006), Cross-code consistency effects in visual word recognition. *In* E. L. GRIGORENKO & A. NAPLES (éds.), *Single-Word Reading : Biological and Behavioral Perspectives* (pp. in press), New York : Lawrence Erlbaum Associates.

GRIGORENKO E. L. (2003), The first candidate gene for dyslexia : Turning the page of a new chapter of research. *Proc Natl Acad Sci USA, 100*(20), 11190-11192.

GRILL-SPECTOR K., KUSHNIR T., HENDLER T., EDELMAN S., ITZCHAK Y. & MALACH R. (1998), A sequence of object-processing stages revealed by fMRI in the human occipital lobe. *Hum. Brain Mapp.*, *6*(4), 316-328.

GRILL-SPECTOR K. & MALACH R. (2001), fMR-adaptation : a tool for studying the functional properties of human cortical neurons. *Acta Psychol (Amst)*, *107*(1-3), 293-321.

GRILL-SPECTOR K., SAYRES R. & RESS D. (2006), High-resolution imaging reveals highly selective nonface clusters in the fusiform face area. *Nat Neurosci*, *9*(9), 1177-1185.

HA DUY THUY D., MATSUO K., NAKAMURA K., TOMA K., OGA T., NAKAI T., SHIBASAKI H. & FUKUYAMA H. (2004), Implicit and explicit processing of kanji and kana words and non-words studied with fMRI. *Neuroimage*, *23*(3), 878-889.

HABIB M. (2000), The neurological basis of developmental dyslexia : an overview and working hypothesis. *Brain*, *123 Pt 12*, 2373-2399.

HAGOORT P., INDEFREY P., BROWN C., HERZOG H., STEINMETZ H. & SEITZ R. J. (1999), The neural circuitry involved in the reading of German words and pseudowords : A PET study. *J Cogn Neurosci*, *11*(4), 383-398.

HANLEY J. R. & KAY J. (1996), Reading speed in pure alexia. *Neuropsychologia*, *34*(12), 1165-1174.

HANNULA-JOUPPI K., KAMINEN-AHOLA N., TAIPALE M., EKLUND R., NOPOLA-HEMMI J., KAARIAINEN H. & KERE J. (2005), The axon guidance receptor gene ROBO1 is a candidate gene for developmental dyslexia. *PLoS Genet*, *1*(4), e50.

HARM M. W. & SEIDENBERG M. S. (1999), Phonology, reading acquisition, and dyslexia : insights from connectionist models. *Psychol Rev*, *106*(3), 491-528.

HARM M. W. & SEIDENBERG M. S. (2004), Computing the meanings of words in reading : cooperative division of labor between visual and phonological processes. *Psychol Rev*, *111*(3), 662-720.

HASSON U., HAREL M., LEVY I. & MALACH R. (2003), Large-scale mirror-symmetry organization of human occipito-temporal object areas. *Neuron*, *37*(6), 1027-1041.

HASSON U., LEVY I., BEHRMANN M., HENDLER T. & MALACH R. (2002), Eccentricity bias as an organizing principle for human high-order object areas. *Neuron, 34*(3), 479-490.

HAXBY J. V., GOBBINI M. I., FUREY M. L., ISHAI A., SCHOUTEN J. L. & PIETRINI P. (2001), Distributed and overlapping representations of faces and objects in ventral temporal cortex. *Science, 293*(5539), 2425-2430.

HAXBY J. V., ISHAI I. I., CHAO L. L., UNGERLEIDER L. G. & MARTIN I. I. (2000), Object-form topology in the ventral temporal lobe. Response to I. Gauthier (2000), *Trends Cogn Sci, 4*(1), 3-4.

HEILMAN K. M., HOWELL G., VALENSTEIN E. & ROTHI L. (1980), Mirror-reading and writing in association with right-left spatial disorientation. *J Neurol Neurosurg Psychiatry, 43*(9), 774-780.

HELENIUS P., TARKIAINEN A., CORNELISSEN P., HANSEN P. C. & SALMELIN R. (1999), Dissociation of normal feature analysis and deficient processing of letter-strings in dyslexic adults. *Cereb Cortex, 9*(5), 476-483.

HERMER L. & SPELKE E. (1996), Modularity and development : the case of spatial reorientation. *Cognition, 61*(3), 195-232.

HOUZEL J. C., CARVALHO M. L. & LENT R. (2002), Interhemispheric connections between primary visual areas : beyond the midline rule. *Braz J Med Biol Res, 35*(12), 1441-1453.

HUBBARD E. M., ARMAN A. C., RAMACHANDRAN V. S. & BOYNTON G. M. (2005), Individual differences among grapheme-color synesthetes : brain-behavior correlations. *Neuron, 45*(6), 975-985.

HUBEL D. H. & WIESEL T. N. (1970), Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *Journal of Physiology, 195*, 215-243.

HUMPHREY N. K. & WEISKRANTZ L. (1969), Size constancy in monkeys with inferotemporal lesions. *Q J Exp Psychol, 21*(3), 225-238.

HUMPHREYS G. W., EVETT L. J. & QUINLAN P. T. (1990), Orthographic processing in visual word identification. *Cognitive Psychology, 22*, 517-560.

HUTZLER F., ZIEGLER J. C., PERRY C., WIMMER H. & ZORZI M. (2004), Do current connectionist learning models account for reading development in different languages ? *Cognition, 91*(3), 273-296.

IRIKI A. (2005), A prototype of Homo-Faber : A silent precursor of human intelligence in the tool-using monkey brain. *In* S. DEHAENE, J. R. DUHAMEL, M. HAUSER & G. RIZZOLATTI (éds.), *From Monkey Brain to Human Brain* (pp. 133-157), Cambridge, Massachusetts : MIT Press.

ISHAI A., UNGERLEIDER L. G., MARTIN A. & HAXBY J. V. (2000), The representation of objects in the human occipital and temporal cortex. *J Cogn Neurosci, 12 Suppl 2*, 35-51.

ISHAI A., UNGERLEIDER L. G., MARTIN A., SCHOUTEN J. L. & HAXBY J. V. (1999), Distributed representation of objects in the human ventral visual pathway. *Proc Natl Acad Sci USA, 96*(16), 9379-9384.

ITO M. & KOMATSU H. (2004), Representation of angles embedded within contour stimuli in area V2 of macaque monkeys. *J Neurosci, 24*(13), 3313-3324.

ITO M., Tamura H., FUJITA I. & TANAKA K. (1995), Size and position invariance of neuronal responses in monkey inferotemporal cortex. *Journal of Neurophysiology, 73*, 218-226.

JACOB F. (1977), Evolution and tinkering. *Science, 196*(4295), 1161-1166.

JACQUEMOT C., PALLIER C., LEBIHAN D., DEHAENE S. & DUPOUX E. (2003), Phonological grammar shapes the auditory cortex : a functional magnetic resonance imaging study. *J Neurosci, 23*(29), 9541-9546.

JARED D. & SEIDENBERG M. S. (1991), Does word identification proceed from spelling to sound to meaning ? *Journal of Experimental Psychology : General, 120*(358-394).

JOBARD G., CRIVELLO F. & TZOURIO-MAZOYER N. (2003), Evaluation of the dual route theory of reading : a metanalysis of 35 neuroimaging studies. *Neuroimage, 20*(2), 693-712.

KANWISHER N., MCDERMOTT J. & CHUN M. M. (1997), The fusiform face area : a module in human extrastriate cortex specialized for face perception. *Journal of Neuroscience, 17*, 4302-4311.

KARMILOFF-SMITH A. (1992), *Beyond Modularity*. Cambridge, Mass. : MIT Press.

KAWAI N. & MATSUZAWA T. (2000), Numerical memory span in a chimpanzee. *Nature*, *403*(6765), 39-40.

KILGARD M. P. & MERZENICH M. M. (1998), Cortical map reorganization enabled by nucleus basalis activity. *Science, 279*(5357), 1714-1718.

KIPLING R. (1961), *Histoires comme ça* (R. D. H. e. L. Pabulet, Trans.), Paris : Éditions Delagrave.

KITTERLE F. L. & SELIG L. M. (1991), Visual field effects in the discrimination of sine-wave gratings. *Percept Psychophys, 50*(1), 15-18.

KLINGBERG T., HEDEHUS M., TEMPLE E., SALZ T., GABRIELI J. D., MOSELEY M. E. & POLDRACK R. A. (2000), Microstructure of temporo-parietal white matter as a basis for reading ability : evidence from diffusion tensor magnetic resonance imaging [see comments]. *Neuron*, *25*(2), 493-500.

KLÜVER H. & BUCY P. C. (1937), Psychic blindness and other symptoms following bilateral temporal lobectomy in rhesus monkey. *American Journal of Physiology*(119), 352-353.

KOLINSKY R., MORAIS J., CONTENT A. & CARY L. (1987), Finding parts within figures : a developmental study. *Perception, 16*(3), 399-407.

KOLINSKY R., MORAIS J. & VERHAEGHE A. (1994), Visual separability : a study on unschooled adults. *Perception, 23*(4), 471-486.

KOTZ S. A., CAPPA S. F., VON CRAMON D. Y. & FRIEDERICI A. D. (2002), Modulation of the lexical-semantic network by auditory semantic priming : an event-related functional MRI study. *Neuroimage*, *17*(4), 1761-1772.

KOYAMA S., KAKIGI R., HOSHIYAMA M. & KITAMURA Y. (1998), Reading of Japanese Kanji (morphograms) and Kana (syllabograms) : a magnetoencephalographic study. *Neuropsychologia, 36*(1), 83-98.

KUHL P. K. (2004), Early language acquisition : cracking the speech code. *Nat Rev Neurosci, 5*(11), 831-843.

KUJALA T., KARMA K., CEPONIENE R., BELITZ S., TURKKILA P., TERVANIEMI M. & NAATANEN R. (2001), Plastic neural changes

and reading improvement caused by audiovisual training in reading-impaired children. *Proc Natl Acad Sci USA, 98*(18), 10509-10514.

KUO W. J., YEH T. C., DUANN J. R., WU Y. T., HO L. T., HUNG D., TZENG O. J. & HSIEH J. C. (2001), A left-lateralized network for reading Chinese words : a 3 T fMRI study. *Neuroreport, 12*(18), 3997-4001.

KUO W. J., YEH T. C., LEE C. Y., WU Y. T., CHOU C. C., HO L. T., HUNG D. L., TZENG O. J. & HSIEH J. C. (2003), Frequency effects of Chinese character processing in the brain : an event-related fMRI study. *Neuroimage, 18*(3), 720-730.

LACHMANN T. & GEYER T. (2003), Letter reversals in dyslexia : Is the case really closed ? A critical review and conclusions. *Psychology science, 45*, 50-70.

LAMBON-RALPH M. A., JARVIS C. & ELLIS A. W. (1997), Life in a mirrored world : Report of a case showing mirror reversal in reading and writing and for non-verbal materials. *Neurocase, 3*, 249-258.

LARSON K. (2004), *The Science of Word Recognition*, site Internet http://www.microsoft.com/typography/ctfonts/WordRecognition.aspx

LAUFS H., KRAKOW K., STERZER P., EGER E., BEYERLE A., SALEK-HADDADI A. & KLEINSCHMIDT A. (2003), Electroencephalographic signatures of attentional and cognitive default modes in spontaneous brain activity fluctuations at rest. *Proc Natl Acad Sci USA, 100*(19), 11053-11058.

LAUREYS S. (2005), The neural correlate of (un)awareness : lessons from the vegetative state. *Trends Cogn Sci, 9*, 556-559.

LAVIDOR M., BABKOFF H. & FAUST M. (2001), Analysis of standard and non-standard visual word format in the two hemispheres. *Neuropsychologia, 39*(4), 430-439.

LAVIDOR M. & ELLIS A. W. (2002), Word length and orthographic neighborhood size effects in the left and right cerebral hemispheres. *Brain & Language, 80*, 45-62.

LE BIHAN D., URAYAMA S., ASO T., HANAKAWA T. & FUKUYAMA H. (2006), Direct and fast detection of neuronal activation in the human brain with diffusion MRI. *Proc Natl Acad Sci USA, 103*(21), 8263-8268.

LEE C. Y., TSAI J. L., KUO W. J., YEH T. C., WU Y. T., HO L. T., HUNG D. L., TZENG O. J. & HSIEH J. C. (2004), Neuronal correlates of consistency and frequency effects on Chinese character naming : an event-related fMRI study. *Neuroimage, 23*(4), 1235-1245.

LEE K. M. (2004), Functional MRI comparison between reading ideographic and phonographic scripts of one language. *Brain Lang, 91*(2), 245-251.

LEFF A. P., CREWES H., PLANT G. T., SCOTT S. K., KENNARD C. & WISE R. J. (2001), The functional anatomy of single-word reading in patients with hemianopic and pure alexia. *Brain, 124*(Pt 3), 510-521.

LEPPANEN P. H., RICHARDSON U., PIHKO E., EKLUND K. M., GUTTORM T. K., ARO M. & LYYTINEN H. (2002), Brain responses to changes in speech sound durations differ between infants with and without familial risk for dyslexia. *Dev Neuropsychol, 22*(1), 407-422.

LERNER Y., HENDLER T., BEN-BASHAT D., HAREL M. & MALACH R. (2001), A hierarchical axis of object processing stages in the human visual cortex. *Cereb Cortex, 11*(4), 287-297.

LEROI-GOURHAN A. (1964), *Le Geste et la parole*. Paris : Albin Michel.

LEROI-GOURHAN A. (1983), *Le Fil du temps*. Paris : Fayard.

LÉVI-STRAUSS C. (1958), *Anthropologie structurale*. Paris : Plon.

LEVY I., HASSON U., AVIDAN G., HENDLER T. & MALACH R. (2001), Center-periphery organization of human object areas. *Nat Neurosci, 4*(5), 533-539.

LIBERMAN I. Y., SHANKWEILER D., ORLANDO C., HARRIS K. S. & BERTI F. B. (1971), Letter confusions and reversals of sequence in the beginning reader : implications for Orton’s theory of developmental dyslexia. *Cortex, 7*(2), 127-142.

LISSAUER H. (1890), Ein fall von seelenblindheit nebst einem Beitrage zur Theorie derselben. *Arch. Psychiatr. Nervenkr., 21*, 222-270.

LOGOTHETIS N. K., PAULS J. & POGGIO T. (1995), Shape representation in the inferior temporal cortex of monkeys. *Curr Biol, 5*(5), 552-563.

LONGTIN C.-M., SEGUI J. & HALLÉ P. A. (2003), Morphological priming without morphological relationship. *Language and Cognitive Processes, 18*, 313-334.

LUKATELA G., FROST S. J. & TURVEY M. T. (1998), Phonological priming by masked nonword primes in the lexical decision task. *Journal of Memory and Language, 39*, 666-683.

MALACH R., LEVY I. & HASSON U. (2002), The topography of high-order human object areas. *Trends Cogn Sci, 6*(4), 176-184.

MANGUEL A. (1998), *Une histoire de la lecture*. Arles : Actes Sud.

MANN V. A. (1986), Phonological awareness : the role of reading experience. *Cognition, 24*(1-2), 65-92.

MARCUS G. F. & BERENT I. (2003), Are there limits to statistical learning ? *Science, 300*(5616), 53-55; author reply 53-55.

MARCUS G. F., VIJAYAN S., BANDI RAO S. & VISHTON P. M. (1999), Rule learning by seven-month-old infants. *Science, 283*(5398), 77-80.

MARINKOVIC K., DHOND R. P., DALE A. M., GLESSNER M., CARR V. & HALGREN E. (2003), Spatiotemporal dynamics of modality-specific and supramodal word processing. *Neuron, 38*(3), 487-497.

MARKS L. E. (1978), *The Unity of the Senses*. New York : Academic Press.

MARSHALL J. C. & NEWCOMBE F. (1973), Patterns of paralexia : A psycholinguistic approach. *Journal of Psycholinguistic Research, 2*, 175-199.

MARTIN A., WIGGS C. L., UNGERLEIDER L. G. & HAXBY J. V. (1996), Neural correlates of category-specific knowledge. *Nature, 379*, 649-652.

MARTINET C., VALDOIS S. & FAYOL M. (2004), Lexical orthographic knowledge develops from the beginning of literacy acquisition. *Cognition, 91*(2), B11-22.

MATSUZAWA T. (1985), Use of numbers by a chimpanzee. *Nature, 315*(6014), 57-59.

MAURER D., PATHMAN T. & MONDLOCH C. J. (2006), The shape of boubas : sound-shape correspondences in toddlers and adults. *Dev Sci, 9*(3), 316-322.

MAURER U., BREM S., BUCHER K. & BRANDEIS D. (2005), Emerging neurophysiological specialization for letter strings. *J. Cogn. Neurosci., 17*(10), 1532.

MAURER U., BUCHER K., BREM S. & BRANDEIS D. (2003), Altered responses to tone and phoneme mismatch in kindergartners at familial

dyslexia risk. *Neuroreport, 14*(17), 2245-2250.
MAYALL K., HUMPHREYS G. W., MECHELLI A., OLSON A. & PRICE C. J. (2001), The effects of case mixing on word recognition : evidence from a PET study. *J Cogn Neurosci*, *13*(6), 844-853.
MAYALL K., HUMPHREYS G. W. & OLSON A. (1997), Disruption to word or letter processing ? The origins of case-mixing effects. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn, 23*(5), 1275-1286.
MAZOYER B. M., DEHAENE S., TZOURIO N., FRAK V., SYROTA A., Murayama N., LEVRIER O., SALAMON G., COHEN L. & MEHLER J. (1993), The cortical representation of speech. *Journal of Cognitive Neuroscience, 5*, 467-479.
MCCANDLISS B. D., COHEN L. & DEHAENE S. (2003), The visual word form area : expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends Cogn Sci, 7*, 293-299.
MCCANDLISS B. D., CURRAN T. & POSNER M. I. (1993), Repetition effects in processing visual words : a high density ERP study of lateralized stimuli. *Neuroscience Abstracts, 19*, 1807.
MCCARTHY R. A. & WARRINGTON E. K. (1990), *Cognitive Neuropsychology : a Clinical Introduction*. San Diego : Academic Press.
MCCLELLAND J. L. & RUMELHART D. E. (1981), An interactive activation model of context effects in letter perception : I. An account of basic findings. *Psychological Review, 88*, 375-407.
MCCLOSKEY M. & Rapp B. (2000), A visually based developmental reading deficit. *Journal of Memory and Language, 43*, 157-181.
MCCLOSKEY M., RAPP B., YANTIS S., RUBIN G., BACON W., DAGNELIE G., GORDON B., ALIMINOSA D., BOATMAN D. F., BADECKER W., JOHNSON D. N., TUSA R. J. & PALMER E. (1995), A developmental deficit in localizing objects from vision. *Psychological Science, 6*, 112-117.
MCCONKIE G. W. & RAYNER K. (1975), The span of the effective stimulus during a fixation in reading. Perception & Psychophysics. *Percept Psychophys, 17*, 578-586.
MCCONKIE G. W. & ZOLA D. (1979), Is visual information integrated across successive fixations in reading ? *Percept Psychophys*, *25*(3), 221-224.

MCCRORY E. J., MECHELLI A., FRITH U. & PRICE C. J. (2005), More than words : a common neural basis for reading and naming deficits in developmental dyslexia ? *Brain, 128*(Pt 2), 261-267.

MCMONNIES C. W. (1992), Visuo-spatial discrimination and mirror image letter reversals in reading. *J Am Optom Assoc, 63*(10), 698-704.

MECHELLI A., GORNO-TEMPINI M. L. & PRICE C. J. (2003), Neuroimaging studies of word and pseudoword reading : consistencies, inconsistencies, and limitations. *J Cogn Neurosci, 15*(2), 260-271.

MEHLER J., JUSCZYK P., LAMBERTZ G., HALSTED N., BERTONCINI J. & AMIEL-TISON C. (1988), A precusor of language acquisition in young infants. *Cognition, 29*.

MELLO N. K. (1965), Interhemispheric reversal of mirror-image oblique lines following monocular training in pigeons. *Science, 148,* 252-254.

MELLO N. K. (1966), Interocular generalization : a study of mirror-image reversal following monocular discrimination training in the pigeon. *J Exp Anal Behav, 9*(1), 11-16.

MELLO N. K. (1967), Inter-hemispheric comparison of visual stimuli in the pigeon. *Nature, 214*(84), 144-145.

MENG H., SMITH S. D., HAGER K., HELD M., LIU J., OLSON R. K., PENNINGTON B. F., DEFRIES J. C., GELERNTER J., O'REILLY-POL T., SOMLO S., SKUDLARSKI P., SHAYWITZ S. E., SHAYWITZ B. A., MARCHIONE K., WANG Y., PARAMASIVAM M., LOTURCO J. J., PAGE G. P. & GRUEN J. R. (2005), DCDC2 is associated with reading disability and modulates neuronal development in the brain. *Proc Natl Acad Sci USA, 102*(47), 17053-17058.

MERZENICH M. M., JENKINS W. M., JOHNSTON P., SCHREINER C., MILLER S. L. & TALLAL P. (1996), Temporal processing deficits of language-learning impaired children ameliorated by training. *Science, 271*(5245), 77-81.

MIOZZO M. & CARAMAZZA A. (1998), Varieties of pure alexia : The case of failure to access graphemic representations. *Cognitive Neuropsychology, 15*, 203-238.

MISHKIN M. & PRIBRAM K. H. (1954), Visual discrimination performance following partial ablations of the temporal lobe. I. Ventral vs. lateral. *J Comp Physiol Psychol, 47*(1), 14-20.

MITHEN S. (1996), *The Prehistory of the Mind : The Cognitive Origins of Art, Religion and Science*. London : Thames & Hudson.

MIYASHITA Y. (1988), Neuronal correlate of visual associative long-term memory in the primate temporal cortex. *Nature, 335*(6193), 817-820.

MOLKO N., COHEN L., MANGIN J. F., CHOCHON F., LEHÉRICY S., LE BIHAN D. & DEHAENE S. (2002), Visualizing the neural bases of a disconnection syndrome with diffusion tensor imaging. *Journal of Cognitive Neuroscience, 14*, 629-636.

MONDLOCH C. J. & MAURER D. (2004), Do small white balls squeak ? Pitch-object correspondences in young children. *Cogn Affect Behav Neurosci, 4*(2), 133-136.

MONTANT M. & BEHRMANN M. (2000), Pure alexia. *Neurocase, 6*, 265-294.

MORAIS J., BERTELSON P., CARY L. & ALEGRIA J. (1986), Literacy training and speech segmentation. *Cognition, 24*, 45-64.

MORAIS J., CARY L., ALEGRIA J. & BERTELSON P. (1979), Does awareness of speech as a sequence of phones arise spontaneously ? *Cognition, 7*, 323-331.

MORRISON R. E. & RAYNER K. (1981), Saccade size in reading depends upon character spaces and not visual angle. *Percept Psychophys, 30*(4), 395-396.

MOZER M. C. (1987), Early parallel processing in reading : a connectionist approach. *In* M. COLTHEART (éd.), *Attention and Performance XII : The Psychology of Reading.* (pp. 83-104), Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.

NAATANEN R., LEHTOKOSKI A., LENNES M., CHEOUR M., HUOTILAINEN M., IIVONEN A., VAINIO M., ALKU P., ILMONIEMI R. J., LUUK A., ALLIK J., SINKKONEN J. & ALHO K. (1997), Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature, 385*(6615), 432-434.

NACCACHE L. & DEHAENE S. (2001), The priming method : imaging unconscious repetition priming reveals an abstract representation of number in the parietal lobes. *Cereb Cortex, 11*(10), 966-974.

NAKAMURA K., DEHAENE S., JOBERT A., LE BIHAN D. & KOUIDER S. (2005), Subliminal convergence of Kanji and Kana words : further evidence for functional parcellation of the posterior

temporal cortex in visual word perception. *J Cogn Neurosci, 17*(6), 954-968.

NAKAMURA K., HONDA M., OKADA T., HANAKAWA T., TOMA K., FUKUYAMA H., KONISHI J. & SHIBASAKI H. (2000), Participation of the left posterior inferior temporal cortex in writing and mental recall of Kanji orthography : A functional MRI study. *Brain, 123*(Pt 5), 954-967.

NATION K., ALLEN R. & HULME C. (2001), The limitations of orthographic analogy in early reading development : performance on the clue-word task depends on phonological priming and elementary decoding skill, not the use of orthographic analogy. *J Exp Child Psychol, 80*(1), 75-94.

National Institute of Child Health and Human Development. (2000), *Report of the National Reading Panel. Teaching Children to Read : An Evidence-based Assessment of the Scientific Research Literature on Reading and its Implications for Reading Instruction (NIH Publication No. 00-4769)*. Washington, DC : U.S. Government Printing Office.

NAZIR T. A., BEN-BOUTAYAB N., DECOPPET N., DEUTSCH A. & FROST R. (2004), Reading habits, perceptual learning, and recognition of printed words. *Brain Lang, 88*(3), 294-311.

NICOLSON R. I., FAWCETT A. J. & DEAN P. (2001), Developmental dyslexia : the cerebellar deficit hypothesis. *Trends Neurosci, 24*(9), 508-511.

NIEDER A., DIESTER I. & TUDUSCIUC O. (2006), Temporal and spatial enumeration processes in the primate parietal cortex. *Science, 313*(5792), 1431-1435.

NIEDER A. & MILLER E. K. (2004), A parieto-frontal network for visual numerical information in the monkey. *Proc Natl Acad Sci USA, 101*(19), 7457-7462.

NIMCHINSKY E. A., GILISSEN E., ALLMAN J. M., PERL D. P., ERWIN J. M. & HOF P. R. (1999), A neuronal morphologic type unique to humans and great apes. *Proc Natl Acad Sci USA, 96*(9), 5268-5273.

NIOGI S. N. & MCCANDLISS B. D. (2006), Left lateralized white matter microstructure accounts for individual differences in reading ability and disability. *Neuropsychologia*.

NIR Y., HASSON U., LEVY I., YESHURUN Y. & MALACH R. (2006), Widespread functional connectivity and fMRI fluctuations in human visual cortex in the absence of visual stimulation. *Neuroimage, 30*(4), 1313-1324.

NOBRE A. C., ALLISON T. & MCCARTHY G. (1994), Word recognition in the human inferior temporal lobe. *Nature*, *372*(6503), 260-263.

NUNEZ R. E. & LAKOFF G. (2000), *Where Mathematics Comes From : How the Embodied Mind Brings Mathematics into Being*. New York : Basic books.

O'REGAN J. K. (1990), Eye movements and reading. *Rev Oculomot Res, 4*, 395-453.

OLAVARRIA J. F. & HIROI R. (2003), Retinal influences specify cortico-cortical maps by postnatal day six in rats and mice. *J Comp Neurol, 459*(2), 156-172.

ORTON S. T. (1925), « Word-blindness » in school children. *Archives of Neurology and Psychiatry, 14*, 581-615.

ORTON S. T. (1937), *Reading, Writing, and Speech Problems in Children*. New York : Norton.

PAAP K. R., NEWSOME S. L. & NOEL R. W. (1984), Word shape's in poor shape for the race to the lexicon. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, *10*(3), 413-428.

PACTON S., PERRUCHET P., FAYOL M. & CLEEREMANS A. (2001), Implicit learning out of the lab : the case of orthographic regularities. *J Exp Psychol Gen*, *130*(3), 401-426.

PAMMER K., HANSEN P. C., KRINGELBACH M. L., HOLLIDAY I., BARNES G., HILLEBRAND A., SINGH K. D. & CORNELISSEN P. L. (2004), Visual word recognition : the first half second. *Neuroimage, 22*(4), 1819-1825.

PARACCHINI S., THOMAS A., CASTRO S., LAI C., PARAMASIVAM M., WANG Y., KEATING B. J., TAYLOR J. M., HACKING D. F., SCERRI T., FRANCKS C., RICHARDSON A. J., WADE-MARTINS R., STEIN J. F., KNIGHT J. C., COPP A. J., LOTURCO J. & MONACO A. P. (2006), The chromosome 6p22 haplotype associated with dyslexia reduces the expression of KIAA0319, a novel gene involved in neuronal migration. *Hum Mol Genet, 15*(10), 1659-1666.

PARVIAINEN T., HELENIUS P., POSKIPARTA E., NIEMI P. & SALMELIN R. (2006), Cortical sequence of word perception in beginning readers. *J Neurosci, 26*(22), 6052-6061.

PASCALIS O., DE HAAN M. & NELSON C. A. (2002), Is face processing species-specific during the first year of life ? *Science, 296*(5571), 1321-1323.

PASCALIS O. & DE SCHONEN S. (1994), Recognition memory in 3- to 4-day-old human neonates. *Neuroreport, 5*(14), 1721-1724.

PASCALIS O., SCOTT L. S., KELLY D. J., SHANNON R. W., NICHOLSON E., COLEMAN M. & NELSON C. A. (2005), Plasticity of face processing in infancy. *Proc Natl Acad Sci USA, 102*(14), 5297-5300.

PATTERSON K. & KAY J. (1982), Letter-by-letter reading : Psychological descriptions of a neurological syndrome. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 34A*, 411-441.

PAULESU E., DEMONET J. F., FAZIO F., MCCRORY E., CHANOINE V., BRUNSWICK N., CAPPA S. F., COSSU G., HABIB M., FRITH C. D. & FRITH U. (2001), Dyslexia : cultural diversity and biological unity. *Science, 291*(5511), 2165-2167.

PAULESU E., FRITH C. D. & FRACKOWIAK R. S. J. (1993), The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature, 362*, 342-345.

PAULESU E., FRITH U., SNOWLING M., GALLAGHER A., MORTON J., FRACKOWIAK R. & FRITH C. D. (1996), Is developmental dyslexia a disconnection syndrome ? Evidence from PET scanning. *Brain, 119*, 143-157.

PAULESU E., MCCRORY E., FAZIO F., MENONCELLO L., BRUNSWICK N., CAPPA S. F., COTELLI M., COSSU G., CORTE F., LORUSSO M., PESENTI S., GALLAGHER A., PERANI D., PRICE C., FRITH C. D. & FRITH U. (2000), A cultural effect on brain function. *Nat Neurosci, 3*(1), 91-96.

PELLI D. G., FARELL B. & MOORE D. C. (2003), The remarkable inefficiency of word recognition. *Nature, 423*(6941), 752-756.

PENA M., MAKI A., KOVACIC D., DEHAENE-LAMBERTZ G., KOIZUMI H., BOUQUET F. & MEHLER J. (2003), Sounds and

silence : an optical topography study of language recognition at birth. *Proc Natl Acad Sci USA, 100*(20), 11702-11705.

PEREA M. & LUPKER S. J. (2003), Does jugde activate COURT ? Transposed-letter similarity effects in masked associative priming. *Mem Cognit, 31*(6), 829-841.

PERESSOTTI F. & GRAINGER J. (1999), The role of letter identity and letter position in orthographic priming. *Percept Psychophys, 61*(4), 691-706.

PERFETTI C. & BELL L. (1991), Phonemic activation during the first 40 ms of word identification : Evidence from backward masking and masked priming. *Journal of Memory and Language, 30*, 473-485.

PERRETT D. I., MISTLIN A. J. & CHITTY A. J. (1989), Visual neurones responsive to faces. *Trends in Neuroscience, 10*, 358-364.

PERRY C., ZIEGLER J. & ZORZI M. (2007), Nested incremental modeling in the development of computational theories : the CDP+ model of reading aloud. *Psychological Review*, à paraître.

PETERSEN S. E., FOX P. T., POSNER M. I., MINTUN M. & RAICHLE M. E. (1988), Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature, 331*(6157), 585-589.

PETERSEN S. E., FOX P. T., POS NER M. I., MINTUN M. & RAICHLE M. E. (1989), Positron emission tomographic studies of the processing of single words. *Journal of Cognitive Neuroscience, 1*, 153-170.

PETERSEN S. E., FOX P. T., SNYDER A. Z. & RAICHLE M. E. (1990), Activation of extrastriate and frontal cortical areas by visual words and word-like stimuli. *Science, 249*, 1041-1044.

PICA P., LEMER C., IZARD V. & DEHAENE S. (2004), Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group. *Science, 306*(5695), 499-503.

PINEL P., DEHAENE S., RIVIERE D. & LEBIHAN D. (2001), Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *Neuroimage, 14*(5), 1013-1026.

PLAUT D. C., MCCLELLAND J. L., SEIDENBERG M. S. & PATTERSON K. (1996), Understanding normal and impaired word reading : computational principles in quasi-regular domains. *Psychol Rev, 103*(1), 56-115.

POLK T. A. & FARAH M. J. (2002), Functional MRI evidence for an abstract, not perceptual, word-form area. *J Exp Psychol Gen*, *131*(1), 65-72.

POLK T. A., STALLCUP M., AGUIRRE G. K., ALSOP D. C., D'ESPOSITO M., DETRE J. A. & FARAH M. J. (2002), Neural specialization for letter recognition. *J Cogn Neurosci*, *14*(2), 145-159.

POLLATSEK A., BOLOZKY S., WELL A. D. & RAYNER K. (1981), Asymmetries in the perceptual span for Israeli readers. *Brain Lang*, *14*(1), 174-180.

POSNER M. I. & MCCANDLISS B. D. (1999), Brain circuitry during reading. *In* R. M. KLEIN & P. A. MCMULLEN (éds.), *Converging Methods for Understanding Reading and Dyslexia* (pp. 305-337), Cambridge : MIT Press.

POSNER M. I., PETERSEN S. E., FOX P. T. & RAICHLE M. E. (1988), Localization of cognitive operations in the human brain. *Science, 240*, 1627-1631.

POURATIAN N., BOOKHEIMER S. Y., RUBINO G., MARTIN N. A. & TOGA A. W. (2003), Category-specific naming deficit identified by intraoperative stimulation mapping and postoperative neuropsychological testing. Case report. *J Neurosurg*, *99*(1), 170-176.

PRICE C. (1998), The functional anatomy of word comprehension and production. *Trends in Cognitive Sciences, 2*, 281-288.

PRICE C. J. & DEVLIN J. T. (2003), The myth of the visual word form area. *Neuroimage, 19*, 473-481.

PRICE C. J., GORNO-TEMPINI M. L., GRAHAM K. S., BIGGIO N., MECHELLI A., PATTERSON K. & NOPPENEY U. (2003), Normal and pathological reading : converging data from lesion and imaging studies. *Neuroimage, 20 Suppl 1*, S30-41.

PRICE C. J., MOORE C. J., HUMPHREYS G. W. & WISE R. J. S. (1997), Segregating semantic from phonological processes during reading. *Journal of Cognitive Neuroscience, 9*, 727-733.

PRICE C. J., WISE R. J. S. & FRACKOWIAK R. S. J. (1996), Demonstrating the implicit processing of visually presented words and pseudowords. *Cerebral Cortex, 6*, 62-70.

PRIFTIS K., RUSCONI E., UMILTA C. & ZORZI M. (2003), Pure agnosia for mirror stimuli after right inferior parietal lesion. *Brain, 126*(Pt 4),

908-919.
PRINZMETAL W. (1990), Neon colors illuminate reading units. *J Exp Psychol Hum Percept Perform, 16*(3), 584-597.
PRINZMETAL W., TREIMAN R. & RHO S. H. (1986), How to see a reading unit. *Journal of Memory and Language, 25*, 461-475.
PUCE A., ALLISON T., ASGARI M., GORE J. C. & MCCARTHY G. (1996), Differential sensitivity of human visual cortex to faces, letterstrings, and textures : a functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Neuroscience, 16*, 5205-5215.
PUGH K. R., SHAYWITZ B. A., SHAYWITZ S. E., CONSTABLE R. T., SKUDLARSKI P., FULBRIGHT R. K., BRONEN R. A., SHANKWEILER D. P., KATZ L., FLETCHER J. M. & GORE J. C. (1996), Cerebral organization of component processes in reading. *Brain, 119*(Pt 4), 1221-1238.
PULVERMULLER F. (2005), Brain mechanisms linking language and action. *Nat Rev Neurosci, 6*(7), 576-582.
QUARTZ S. R. & SEJNOWSKI T. J. (1997), The neural basis of cognitive development : a constructivist manifesto. *Behav Brain Sci, 20*(4), 537-556; discussion 556-596.
QUIROGA R. Q., REDDY L., KREIMAN G., KOCH C. & FRIED I. (2005), Invariant visual representation by single neurons in the human brain. *Nature, 435*(7045), 1102-1107.
RAICHLE M. E., MACLEOD A. M., SNYDER A. Z., POWERS W. J., GUSNARD D. A. & SHULMAN G. L. (2001), A default mode of brain function. *Proc Natl Acad Sci USA, 98*(2), 676-682.
RAIJ T., UUTELA K. & HARI R. (2000), Audiovisual integration of letters in the human brain. *Neuron, 28*(2), 617-625.
RAMACHANDRAN V. S. (2005), *The Artful Brain* : Fourth Estate.
RAMACHANDRAN V. S. & HUBBARD E. M. (2001a), Psychophysical investigations into the neural basis of synaesthesia. *Proc Biol Sci, 268*(1470), 979-983.
RAMACHANDRAN V. S. & HUBBARD E. M. (2001b), Synaesthesia – A window into perception, thought and language. *Journal of Consciousness Studies, 8*, 3-34.
RAMUS F. (2003), Developmental dyslexia : specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction ? *Curr Opin Neurobiol, 13*(2), 212-

218.
RAMUS F. (2004), Neurobiology of dyslexia : a reinterpretation of the data. *Trends Neurosci, 27*(12), 720-726.
RAMUS F., PIDGEON E. & FRITH U. (2003), The relationship between motor control and phonology in dyslexic children. *J Child Psychol Psychiatry, 44*(5), 712-722.
RAMUS F., ROSEN S., DAKIN S. C., DAY B. L., CASTELLOTE J. M., WHITE S. & FRITH U. (2003), Theories of developmental dyslexia : insights from a multiple case study of dyslexic adults. *Brain, 126*(Pt 4), 841-865.
RASTLE K., DAVIS M. H., MARSLEN-WILSON W. D. & TYLER L. K. (2000), Morphological and semantic effects in visual word recognition : A time-course study. *Language and Cognitive Processes, 15*, 507-537.
RAYNER K. (1998), Eye movements in reading and information processing : 20 years of research. *Psychol Bull, 124*(3), 372-422.
RAYNER K. & BERTERA J. H. (1979), Reading without a fovea. *Science, 206*(4417), 468-469.
RAYNER K., FOORMAN B. R., PERFETTI C. A., PESETSKY D. & SEIDENBERG M. S. (2001), How psychological science informs the teaching of reading. *Psychol Sci, 2*, 31-74.
Rayner K., Inhoff A. W., Morrison R. E., Slowiaczek M. L. & Bertera J. H. (1981), Masking of foveal and parafoveal vision during eye fixations in reading. *J Exp Psychol Hum Percept Perform, 7*(1), 167-179.
RAYNER K., MCCONKIE G. W. & ZOLA D. (1980), Integrating information across eye movements. *Cognit Psychol, 12*(2), 206-226.
RAYNER K. & POLLATSEK A. (1989), *The Psychology of Reading.* Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall.
RAYNER K., WELL A. D. & POLLATSEK A. (1980), Asymmetry of the effective visual field in reading. *Percept Psychophys, 27*(6), 537-544.
READ C., ZHANG Y. F., NIE H. Y. & DING B. Q. (1986), The ability to manipulate speech sounds depends on knowing alphabetic writing. *Cognition, 24*(1-2), 31-44.
REICHER G. M. (1969), Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *J Exp Psychol, 81*, 274-280.
REY A., JACOBS A. M., SCHMIDT-WEIGAND F. & ZIEGLER J. C. (1998), A phoneme effect in visual word recognition. *Cognition, 68*(3),

B71-80.
REY A., ZIEGLER J. C. & JACOBS A. M. (2000), Graphemes are perceptual reading units. *Cognition, 75*(1), B1-12.
RICHARDSON U., LEPPANEN P. H., LEIWO M. & LYYTINEN H. (2003), Speech perception of infants with high familial risk for dyslexia differ at the age of 6 months. *Dev Neuropsychol, 23*(3), 385-397.
RIDDOCH M. J. & HUMPHREYS G. W. (1988), Description of a left-right coding deficit in a case of constructional apraxia. *Cognitive Neuropsychology, 5*, 289-315.
RIESENHUBER M. & POGGIO T. (1999), Hierarchical models of object recognition in cortex. *Nature Neuroscience, 2*, 1019-1025.
RISSMAN J., ELIASSEN J. C. & BLUMSTEIN S. E. (2003), An Event-Related fMRI Investigation of Implicit Semantic Priming. *J. Cogn. Neurosci., 15*(8), 1160-1175.
ROBERTSON L. C. & LAMB M. R. (1991), Neuropsychological contributions to theories of part/whole organization. *Cognit Psychol, 23*(2), 299-330.
ROBINSON A. J. & PASCALIS O. (2004), Development of flexible visual recognition memory in human infants. *Dev Sci, 7*(5), 527-533.
RODD J. M., DAVIS M. H. & JOHNSRUDE I. S. (2005), The neural mechanisms of speech comprehension : fMRI studies of semantic ambiguity. *Cereb Cortex, 15*(8), 1261-1269.
RODMAN H. R., SCALAIDHE S. P. O. & GROSS C. G. (1993), Response properties of neurons in temporal cortical visual areas of infant monkeys. *J Neurophysiol, 70*, 1115-1136.
ROLLENHAGEN J. E. & OLSON C. R. (2000), Mirror-image confusion in single neurons of the macaque inferotemporal cortex. *Science, 287*(5457), 1506-1508.
ROLLS E. T. (2000), Functions of the primate temporal lobe cortical visual areas in invariant visual object and face recognition. *Neuron, 27*(2), p205-218.
ROSSION B., KUNG C. C. & TARR M. J. (2004), Visual expertise with nonface objects leads to competition with the early perceptual processing of faces in the human occipitotemporal cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A, 101*(40), 14521-14526.

RUBENSTEIN H., LEWIS S. S. & RUBENSTEIN M. (1971), Evidence for phonemic coding in visual word recognition. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 10*, 645-657.

RUBIN G. S. & TURANO K. (1992), Reading without saccadic eye movements. *Vision Res, 32*(5), 895-902.

RUMELHART D. E. & MCCLELLAND J. L. (1982), An interactive activation model of context effects in letter perception : Part 2. The contextual enhancement effect and some tests and extensions of the model. *Psychol Rev, 89*(1), 60-94.

SAFFRAN J. R., ASLIN R. N. & Newport E. L. (1996), Statistical learning by 8-month-old infants. *Science, 274*(5294), 1926-1928.

SAKAI K. & MIYASHITA Y. (1991), Neural organization for the long-term memory of paired associates. *Nature, 354*(6349), 152-155.

SAKURAI Y., ICHIKAWA Y. & MANNEN T. (2001), Pure alexia from a posterior occipital lesion. *Neurology, 56*(6), 778-781.

SAKURAI Y., MOMOSE T., IWATA M., SUDO Y., OHTOMO K. & KANAZAWA I. (2000), Different cortical activity in reading of Kanji words, Kana words and Kana nonwords. *Brain Res Cogn Brain Res, 9*(1), 111-115.

SAKURAI Y., TAKEUCHI S., TAKADA T., HORIUCHI E., NAKASE H. & SAKUTA M. (2000), Alexia caused by a fusiform or posterior inferior temporal lesion. *J Neurol Sci, 178*(1), 42-51.

SALMELIN R., SERVICE E., KIESILA P., UUTELA K. & SALONEN O. (1996), Impaired visual word processing in dyslexia revealed with magnetoencephalography. *Ann Neurol, 40*(2), 157-162.

SARY G., VOGELS R. & ORBAN G. A. (1993), Cue-invariant shape selectivity of macaque inferior temporal neurons. *Science, 260*(5110), 995-997.

SASAKI Y., VANDUFFEL W., KNUTSEN T., TYLER C. & TOOTELL R. (2005), Symmetry activates extrastriate visual cortex in human and nonhuman primates. *Proc Natl Acad Sci USA, 102*(8), 3159-3163.

SASANUMA S. (1975), Kana and Kanji processing in Japanese aphasics. *Brain Lang, 2*(3), 369-383.

SCHMANDT-BESSERAT D. (1996), *How Writing Came About*. Austin, Texas : University of Texas Press.

SCHOENEMANN P. T., SHEEHAN M. J. & GLOTZER L. D. (2005), Prefrontal white matter volume is disproportionately larger in humans than in other primates. *Nat Neurosci, 8*(2), 242-252.

SCHOONBAERT S. & GRAINGER J. (2004), Letter position coding in printed word perception : Effects of repeated and transposed letters. *Language and Cognitive Processes, 19*, 333-367.

SCHWARTZ E. L., DESIMONE R., ALBRIGHT T. D. & GROSS C. G. (1983), Shape recognition and inferior temporal neurons. *Proc Natl Acad Sci USA, 80*(18), 5776-5778.

SEGUI J. & GRAINGER J. (1990), Priming word recognition with orthographic neighbors : effects of relative prime-target frequency. *J Exp Psychol Hum Percept Perform, 16*(1), 65-76.

SEIDENBERG M. S. & MCCLELLAND J. L. (1989), A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychol Rev, 96*(4), 523-568.

SEIDENBERG M. S., PETERSEN A., MACDONALD M. C. & PLAUT D. C. (1996), Pseudohomophone effects and models of word recognition. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition, 22*, 48-62.

SEIDENBERG M. S., TANENHAUS M. K., LEIMAN J. M. & BIENKOWSKI M. (1982), Automatic access of the meanings of ambiguous words in context : Some limitations of knowledge-based processing. *Cognitive Psychology, 14*, 489-537.

SELFRIDGE O. G. (1959), Pandemonium : A paradigm for learning. *In* D. V. BLAKE & A. M. UTTLEY (Eds.), *Proceedings of the Symposium on Mechanisation of Thought Processes* (pp. 511-529), London : H. M. Stationary Office.

SERE B., MARENDAZ C. & HERAULT J. (2000), Nonhomogeneous resolution of images of natural scenes. *Perception, 29*(12), 1403-1412.

SEYMOUR P. H., ARO M. & ERSKINE J. M. (2003), Foundation literacy acquisition in European orthographies. *Br J Psychol, 94*(Pt 2), 143-174.

SHALLICE T. (1988), *From Neuropsychology to Mental Structure.* : Cambridge University Press.

SHARE D. L. (1995), Phonological recoding and self-teaching : sine qua non of reading acquisition. *Cognition, 55*(2), 151-218; discussion 219-126.

SHARE D. L. (1999), Phonological recoding and orthographic learning : A direct test of the self-teaching hypothesis. *J Exp Child Psychol, 72*(2), 95-129.

SHAYWITZ B. A., SHAYWITZ S. E., PUGH K. R., MENCL W. E., FULBRIGHT R. K., SKUDLARSKI P., CONSTABLE R. T., MARCHIONE K. E., FLETCHER J. M., LYON G. R. & GORE J. C. (2002), Disruption of posterior brain systems for reading in children with developmental dyslexia. *Biol Psychiatry, 52*(2), 101-110.

SHAYWITZ S. E., ESCOBAR M. D., SHAYWITZ B. A., FLETCHER J. M. & MAKUCH R. (1992), Evidence that dyslexia may represent the lower tail of a normal distribution of reading ability. *N Engl J Med, 326*(3), 145-150.

SHAYWITZ S. E., SHAYWITZ B. A., PUGH K. R., FULBRIGHT R. K., CONSTABLE R. T., MENCL W. E., SHANKWEILER D. P., LIBERMAN A. M., SKUDLARSKI P., FLETCHER J. M., KATZ L., MARCHIONE K. E., LACADIE C., GATENBY C. & GORE J. C. (1998), Functional disruption in the organization of the brain for reading in dyslexia. *Proc Natl Acad Sci USA, 95*(5), 2636-2641.

SHELTON J. R., FOUCH E. & CARAMAZZA A. (1998), The selective sparing of body part knowledge : A case study. *NeuroCase, 4*, 339-351.

SIGMAN M. & GILBERT C. D. (2000), Learning to find a shape. *Nat Neurosci, 3*(3), 264-269.

SIGMAN M., PAN H., YANG Y., STERN E., SILBERSWEIG D. & GILBERT C. D. (2005), Top-down reorganization of activity in the visual pathway after learning a shape identification task. *Neuron, 46*(5), 823-835.

SILANI G., FRITH U., DEMONET J. F., FAZIO F., PERANI D., PRICE C., FRITH C. D. & PAULESU E. (2005), Brain abnormalities underlying altered activation in dyslexia : a voxel based morphometry study. *Brain, 128*(Pt 10), 2453-2461.

SIMON O., MANGIN J. F., COHEN L., LE BIHAN D. & DEHAENE S. (2002), Topographical layout of hand, eye, calculation, and language-related areas in the human parietal lobe. *Neuron, 33*(3), 475-487.

SIMOS P. G., BREIER J. I., FLETCHER J. M., BERGMAN E. & PAPANICOLAOU A. C. (2000), Cerebral mechanisms involved

in word reading in dyslexic children : a magnetic source imaging approach. *Cereb Cortex, 10*(8), 809-816.

SIMOS P. G., BREIER J. I., FLETCHER J. M., FOORMAN B. R., CASTILLO E. M. & PAPANICOLAOU A. C. (2002), Brain mechanisms for reading words and pseudowords : an integrated approach. *Cereb Cortex, 12*(3), 297-305.

SIMOS P. G., BREIER J. I., FLETCHER J. M., FOORMAN B. R., MOUZAKI A. & PAPANICOLAOU A. C. (2001), Age-related changes in regional brain activation during phonological decoding and printed word recognition. *Dev Neuropsychol, 19*(2), 191-210.

SIMOS P. G., FLETCHER J. M., BERGMAN E., BREIER J. I., FOORMAN B. R., CASTILLO E. M., DAVIS R. N., FITZGERALD M. & PAPANICOLAOU A. C. (2002), Dyslexia-specific brain activation profile becomes normal following successful remedial training. *Neurology, 58*(8), 1203-1213.

SIOK W. T., PERFETTI C. A., JIN Z. & TAN L. H. (2004), Biological abnormality of impaired reading is constrained by culture. *Nature, 431*(7004), 71-76.

SPERBER D. (1974), Contre certains a priori anthropologiques. *In* E. MORIN & M. PIATELLI-PALMARINI (Eds.), *L'Unité de l'homme : Invariants biologiques et universaux culturels* (pp. 491-512), Paris : Le Seuil.

SPERBER D. (1996), *Explaining Culture : A Naturalistic Approach*. London : Blackwell.

SPERBER D. & HIRSCHFELD L. A. (2004), The cognitive foundations of cultural stability and diversity. *Trends Cogn Sci, 8*, 40-46.

SPERLING J. M., PRVULOVIC D., LINDEN D. E., SINGER W. & STIRN A. (2006), Neuronal correlates of colour-graphemic synaesthesia : a fMRI study. *Cortex, 42*(2), 295-303.

SPOEHR K. T. & SMITH E. E. (1975), The role of orthographic and phonotactic rules in perceiving letter patterns. *J Exp Psychol Hum Percept Perform, 104*(1), 21-34.

SPRENGER-CHAROLLES L. & SIEGEL L. (1997), A longitudinal study of the effects of syllabic structure on the development of reading and spelling skills in French. *Applied Psycholinguistics, 18*, 485-505.

SPRENGER-CHAROLLES L., SIEGEL L. S. & BONNET P. (1998), Reading and spelling acquisition in French : the role of phonological mediation and orthographic factors. *J Exp Child Psychol*, *68*(2), 134-165.

STEIN J. (2001), The magnocellular theory of developmental dyslexia. *Dyslexia*, *7*(1), 12-36.

STREIFLER M. & HOFMAN S. (1976), Sinistrad mirror writing and reading after brain concussion in a bi-systemic (oriento-occidental) polyglot. *Cortex*, *12*, 356-364.

STUART M. (1990), Processing strategies in a phoneme deletion task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *42A*(305-327).

SWINNEY D. A., ONIFER W., PRATHER P. & HIRSHKOWITZ M. (1979), Semantic facilitation across sensory modalities in the processing of individual words and sentences. *Mem Cognit*, *7*(3), 159-165.

TAFT M. (1994), Interactive activation as a framework for understanding morphological processing. *Language and Cognitive Processes*, *9*, 271-294.

TAGAMETS M. A., NOVICK J. M., CHALMERS M. L. & FRIEDMAN R. B. (2000), A parametric approach to orthographic processing in the brain : an fMRI study. *J Cogn Neurosci*, *12*(2), 281-297.

TALLAL P. & GAAB N. (2006), Dynamic auditory processing, musical experience and language development. *Trends Neurosci*, *29*(7), 382-390.

TAMURA H. & TANAKA K. (2001), Visual response properties of cells in the ventral and dorsal parts of the macaque inferotemporal cortex. *Cereb Cortex*, *11*(5), 384-399.

TAN L. H., LIU H. L., PERFETTI C. A., SPINKS J. A., FOX P. T. & GAO J. H. (2001), The neural system underlying Chinese logograph reading. *Neuroimage*, *13*(5), 836-846.

TAN L. H., SPINKS J. A., GAO J. H., LIU H. L., PERFETTI C. A., XIONG J., STOFER K. A., PU Y., LIU Y. & FOX P. T. (2000), Brain activation in the processing of Chinese characters and words : a functional MRI study. *Hum Brain Mapp*, *10*(1), 16-27.

TANAKA K. (1996), Inferotemporal cortex and object vision. *Annual Review of Neuroscience*, *19*, 109-139.

TANAKA K. (2003), Columns for complex visual object features in the inferotemporal cortex : clustering of cells with similar but slightly different stimulus selectivities. *Cereb Cortex, 13*(1), 90-99.

TANAKA M., TOMONAGA M. & MATSUZAWA T. (2003), Finger drawing by infant chimpanzees (Pan troglodytes), *Anim Cogn, 6*(4), 245-251.

TARKIAINEN A., CORNELISSEN P. L. & SALMELIN R. (2002), Dynamics of visual feature analysis and object-level processing in face versus letter-string perception. *Brain, 125*(Pt 5), 1125-1136.

TARKIAINEN A., HELENIUS P., HANSEN P. C., CORNELISSEN P. L. & SALMELIN R. (1999), Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex. *Brain, 122*(Pt 11), 2119-2132.

TARR M. J. & GAUTHIER I. (2000), FFA : a flexible fusiform area for subordinate-level visual processing automatized by expertise. *Nat Neurosci, 3*(8), 764-769.

TARR M. J. & PINKER S. (1989), Mental rotation and orientation-dependence in shape recognition. *Cognit Psychol, 21*(2), 233-282.

TEMPLE E., DEUTSCH G. K., POLDRACK R. A., MILLER S. L., TALLAL P., MERZENICH M. M. & GABRIELI J. D. (2003), Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation : evidence from functional MRI. *Proc Natl Acad Sci USA, 100*(5), 2860-2865.

TEMPLE E., POLDRACK R. A., PROTOPAPAS A., NAGARAJAN S., SALZ T., TALLAL P., MERZENICH M. M. & GABRIELI J. D. (2000), Disruption of the neural response to rapid acoustic stimuli in dyslexia : evidence from functional MRI. *Proc Natl Acad Sci USA, 97*(25), 13907-13912.

TEMPLE E., POLDRACK R. A., SALIDIS J., DEUTSCH G. K., TALLAL P., MERZENICH M. M. & GABRIELI J. D. (2001), Disrupted neural responses to phonological and orthographic processing in dyslexic children : an fMRI study. *Neuroreport, 12*(2), 299-307.

TEREPOCKI M., KRUK R. S. & WILLOWS D. M. (2002), The incidence and nature of letter orientation errors in reading disability. *J Learn Disabil, 35*(3), 214-233.

THOMPSON-SCHILL S. L., D'ESPOSITO M. & KAN I. P. (1999), Effects of repetition and competition on activity in left prefrontal cortex

during word generation. *Neuron, 23*(3), 513-522.
THORPE S., FIZE D. & MARLOT C. (1996), Speed of processing in the human visual system. *Nature, 381*(6582), 520-522.
TOKUNAGA H., NISHIKAWA T., IKEJIRI Y., NAKAGAWA Y., YASUNO F., HASHIKAWA K., NISHIMURA T., SUGITA Y. & TAKEDA M. (1999), Different neural substrates for Kanji and Kana writing : a PET study. *Neuroreport, 10*(16), 3315-3319.
TOMASELLO M. (2000a), *The Cultural Origins of Human Cognition*. Cambridge, Mass. : Harvard University Press.
TOMASELLO M. (2000b), Culture and cognitive development. *Current Directions in Psychological Science, 9*, 37-40.
TOMASELLO M., CARPENTER M., CALL J., BEHNE T. & MOLL H. (2005), Understanding and sharing intentions : the origins of cultural cognition. *Behav Brain Sci, 28*(5), 675-691; discussion 691-735.
TOMASELLO M., STROSBERG R. & AKHTAR N. (1996), Eighteen-month-old children learn words in non-ostensive contexts. *J Child Lang, 23*(1), 157-176.
TORGESEN J. K. (2005), Recent discoveries on remedial interventions for children with dyslexia. *In* M. J. SNOWLING & C. HULME (éds.), *The Science of Reading : A Handbook* (pp. 521-537), Oxford : Blackwell.
TSAO D. Y., FREIWALD W. A., TOOTELL R. B. & LIVINGSTONE M. S. (2006), A cortical region consisting entirely of face-selective cells. *Science, 311*(5761), 670-674.
TSUNODA K., YAMANE Y., NISHIZAKI M. & TANIFUJI M. (2001), Complex objects are represented in macaque inferotemporal cortex by the combination of feature columns. *Nat Neurosci, 4*(8), 832-838.
TURING A. M. (1952), The chemical basis of morphogenesis. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 237*, 37-72.
TURKELTAUB P. E., FLOWERS D. L., VERBALIS A., MIRANDA M., GAREAU L. & EDEN G. F. (2004), The neural basis of hyperlexic reading : an fMRI case study. *Neuron, 41*(1), 11-25.
TURKELTAUB P. E., GAREAU L., FLOWERS D. L., ZEFFIRO T. A. & EDEN G. F. (2003), Development of neural mechanisms for reading. *Nat Neurosci, 6*(7), 767-773.
TURNBULL O. H. (1997), A double dissociation between knowledge of object identity and object orientation. *Neuropsychologia, 35*, 567-570.

TURNBULL O. H., BESCHIN N. & DELLA SALA S. (1997), Agnosia for object orientation : implications for theories of object recognition. *Neuropsychologia, 35*(2), 153-163.

TURNBULL O. H. & MCCARTHY R. A. (1996), Failure to discriminate between mirror-image objects : A case of viewpoint-independent object recognition ? *Neurocase, 2*, 63-72.

TZOURIO-MAZOYER N., DE SCHONEN S., CRIVELLO F., REUTTER B., AUJARD Y. & MAZOYER B. (2002), Neural correlates of woman face processing by 2-month-old infants. *Neuroimage, 15*(2), 454-461.

UNGERLEIDER L. G. & MISHKIN M. (1982), Two cortical visual systems. *In* D. J. INGLE, M. A. GOODALE & R. J. MANSFIELD (éds.), *Analysis of Visual Behavior* (pp. 549-586), Cambridge : MIT Press.

VALDOIS S., BOSSE M. L. & TAINTURIER M. J. (2004), The cognitive deficits responsible for developmental dyslexia : review of evidence for a selective visual attentional disorder. *Dyslexia, 10*(4), 339-363.

VAN ATTEVELDT N., FORMISANO E., GOEBEL R. & BLOMERT L. (2004), Integration of letters and speech sounds in the human brain. *Neuron, 43*(2), 271-282.

VAN ESSEN D. C., LEWIS J. W., DRURY H. A., HADJIKHANI N., TOOTELL R. B., BAKIRCIOGLU M. & MILLER M. I. (2001), Mapping visual cortex in monkeys and humans using surface-based atlases. *Vision Res, 41*(10-11), 1359-1378.

VAN ORDEN G. C., JOHNSTON J. C. & HALE B. L. (1988), Word identification in reading proceeds from spelling to sound to meaning. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn, 14*(3), 371-386.

VANDENBERGHE R., NOBRE A. C. & PRICE C. J. (2002), The response of left temporal cortex to sentences. *J Cogn Neurosci, 14*(4), 550-560.

VANDENBERGHE R., PRICE C., WISE R., JOSEPHS O. & FRACKOWIAK R. S. (1996), Functional anatomy of a common semantic system for words and pictures. *Nature, 383*(6597), 254-256.

VANRULLEN R. & THORPE S. J. (2002), Surfing a spike wave down the ventral stream. *Vision Res, 42*(23), 2593-2615.

VELLUTINO F. R., FLETCHER J. M., SNOWLING M. J. & SCANLON D. M. (2004), Specific reading disability (dyslexia) : what have we

learned in the past four decades ? *J Child Psychol Psychiatry, 45*(1), 2-40.

VINCKENBOSCH E., ROBICHON F. & ELIEZ S. (2005), Gray matter alteration in dyslexia : converging evidence from volumetric and voxel-by-voxel MRI analyses. *Neuropsychologia, 43*(3), 324-331.

VINCKIER F., NACCACHE L., PAPEIX C., FORGET J., HAHN-BARMA V., DEHAENE S. & COHEN L. (2006), « What » and « where » in word reading : ventral coding of written words revealed by parietal atrophy. *J Cogn Neurosci, 18*(12), 1998-2012.

VOGELS R. & BIEDERMAN I. (2002), Effects of illumination intensity and direction on object coding in macaque inferior temporal cortex. *Cereb Cortex, 12*(7), 756-766.

VOGELS R., BIEDERMAN I., BAR M. & LORINCZ A. (2001), Inferior temporal neurons show greater sensitivity to nonaccidental than to metric shape differences. *J Cogn Neurosci, 13*(4), 444-453.

VUILLEUMIER P., HENSON R. N., DRIVER J. & DOLAN R. J. (2002), Multiple levels of visual object constancy revealed by event-related fMRI of repetition priming. *Nat Neurosci, 5*(5), 491-499.

WADE J. B. & HART R. P. (1991), Mirror phenomena in language and nonverbal activities – a case report. *J Clin Exp Neuropsychol, 13*(2), 299-308.

WALLIN N. L., MERKER B. & BROWN S. (2000), *The Origins of Music*. Cambridge, Mass. : MIT Press.

WALSH V. & BUTLER S. R. (1996), The effects of visual cortex lesions on the perception of rotated shapes. *Behav Brain Res, 76*(1-2), 127-142.

WARRINGTON E. K. & DAVIDOFF J. (2000), Failure at object identification improves mirror image matching. *Neuropsychologia, 38*(9), 1229-1234.

WARRINGTON E. K. & SHALLICE T. (1980), Word-form dyslexia. *Brain, 103*, 99-112.

WARRINGTON E. K. & SHALLICE T. (1984), Category-specific semantic impairments. *Brain, 107*, 829-854.

WASHBURN D. A. & RUMBAUGH D. M. (1991), Ordinal judgments of numerical symbols by macaques (*Macaca mulatta*), *Psychological Science, 2*, 190-193.

WEEKES B. S. (1997), Differential effects of number of letters on word and nonword naming latency. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 50A*, 439-456.

WEISKRANTZ L. & SAUNDERS R. C. (1984), Impairments of visual object transforms in monkeys. *Brain, 107 (Pt 4)*, 1033-1072.

WERKER J. F. & TEES R. C. (1984), Cross-language speech perception : Evidence for perceptual reorganization during the first year of life. *Infant Behavior and Development, 7*, 49-63.

WHITE S., MILNE E., ROSEN S., HANSEN P., SWETTENHAM J., FRITH U. & RAMUS F. (2006), The role of sensorimotor impairments in dyslexia : a multiple case study of dyslexic children. *Dev Sci, 9*(3), 237-255; discussion 265-239.

WHITEN A., GOODALL J., MCGREW W. C., NISHIDA T., REYNOLDS V., SUGIYAMA Y., TUTIN C. E., WRANGHAM R. W. & BOESCH C. (1999), Cultures in chimpanzees. *Nature, 399*(6737), 682-685.

WHITNEY C. (2001), How the brain encodes the order of letters in a printed word : the SERIOL model and selective literature review. *Psychon Bull Rev, 8*(2), 221-243.

WOLFF P. H. & MELNGAILIS I. (1996), Reversing letters and reading transformed text in dyslexia : A reassessment. *Reading & Writing, 8*, 341-355.

WONG A. C., GAUTHIER I., WOROCH B., DEBUSE C. & CURRAN T. (2005), An early electrophysiological response associated with expertise in letter perception. *Cogn Affect Behav Neurosci, 5*(3), 306-318.

WYDELL T. N. & BUTTERWORTH B. (1999), A case study of an English-Japanese bilingual with monolingual dyslexia. *Cognition, 70*(3), 273-305.

XU B., GRAFMAN J., GAILLARD W. D., ISHII K., VEGA-BERMUDEZ F., PIETRINI P., REEVES-TYER P., DI CAMILLO P. & THEODORE W. (2001), Conjoint and extended neural networks for the computation of speech codes : the neural basis of selective impairment in reading words and pseudowords. *Cereb Cortex, 11*(3), 267-277.

YONCHEVA Y. N., BLAU V. C., MAURER U. & MCCANDLISS B. D. (2006), *Strategic Focus During Learning Impacts the Neural Basis of*

Expertise in Reading. Paper presented at the Poster presented at the Association for Psychological Science Meeting Convention, New York.

ZALI A. & BERTHIER A. (Eds.), (1997), *L'Aventure des écritures : Naissances*. Paris : Bibliothèque nationale de France.

ZEKI S. (2000), *Inner Vision : An Exploration of Art and the Brain*. New York : Oxford University Press.

ZIEGLER J. C. & GOSWAMI U. (2005), Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages : a psycholinguistic grain size theory. *Psychol Bull*, *131*(1), 3-29.

ZOCCOLOTTI P., DE LUCA M., DI PACE E., GASPERINI F., JUDICA A. & SPINELLI D. (2005), Word length effect in early reading and in developmental dyslexia. *Brain Lang*, *93*(3), 369-373.

ZORZI M., HOUGHTON G. & BUTTERWORTH B. (1998), Two routes or one in reading aloud ? A connectionist dual-process model. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *24*, 1131-1161.

Crédits iconographiques

Figure 2.1 D'après Cohen, L. *et al.* (2003), « Visual word recognition in the left and right hemispheres : Anatomical and functional correlates of peripheral alexias », *Cerebral Cortex*, 13, 1313-1333.

Figure 2.3 © Marc Raichle.

Figure 2.5 D'après Dehaene, S. *et al.* (2002), « The visual word form area : a prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus », *Neuroreport*, 13(3), 321-325.

Figure 2.6 D'après Ishai, A. *et al.* (2000), « The representation of objects in the human occipital and temporal cortex », *J. Cogn. Neurosci., 12 Suppl 2*, 35-51.

Figure 2.7 D'après Puce, A. *et al.* (1996), « Differential sensitivity of human visual cortex to faces, letterstrings, and textures : a functional magnetic resonance imaging study », *Journal of Neuroscience*, 16, 5205-5215.

Figure 2.8 D'après figures 6 et 7 de Tarkiainen, A. *et al.* (2002), « Dynamics of visual feature analysis and object-level processing in face versus letter-string perception », *Brain*, 125(Pt 5), 1125-1136.

Figure 2.9 D'après figures 1, 4, 6 et 14 d'Allison, T. *et al.* (1999), « Electrophysiological studies of human face perception. I : Potentials generated in occipitotemporal cortex by face and non-face stimuli », *Cereb. Cortex*, 9(5), 415-430.

Figure 2.10 D'après figures 5 et 6 de Cohen, L. *et al.* (2000), « The visual word form area : Spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients », *Brain*, 123, 291-307.

Figure 2.11 D'après figures 1, 4 et 5 de Cohen L. *et al*. (2000), « The visual word form area : Spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients », *Brain*, 123, 291-307.

Et d'après figures 1 et 3 de Molko, N. *et al.* (2002), « Visualizing the neural bases of a disconnection syndrome with diffusion tensor imaging », *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 629-636.

Figure 2.12 D'après figures 4 et 5 de Dehaene, S. *et al.* (2001), « Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming », *Nat. Neurosci.*, 4(7), 752-758.

Figure 2.13 D'après figure 1 de Dehaene, S. *et al.* (2004), « Letter binding and invariant recognition of masked words : Behavioral and neuroimaging evidence », *Psychol. Sci.*, 15(5), 307-313.

Figure 2.14 D'après figure 4 de Cohen, L. *et al.* (2002), « Language-specific tuning of visual cortex ? Functional properties of the visual word form area », *Brain*, 125(Pt 5), 1054-1069.

Et d'après figure 4 de Tarkiainen, A. *et al.* (1999), « Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex », *Brain*, 122(Pt 11), 2119-2132.

Figure 2.15 D'après Nakamura *et al*. (2005), Subliminal convergence of Kanji and Kana words : further evidence for functional parcellation of the posterior temporal cortex in visual word perception. *J Cogn Neurosci*, *17*(6), 954-968

Figure 2.16 D'après figures 5 et 8 de Catani, M. *et al.* (2003), « Occipito-temporal connections in the human brain », *Brain*, 126(Pt 9), 2093-2107.

Figure 2.17 D'après figure 1 de Marinkovic, K. *et al.* (2003), « Spatiotemporal dynamics of modality-specific and supramodal word processing », *Neuron*, 38(3), 487-497.

Figure 2.18 D'après figure 5 de Jobard, G. *et al.* (2003), « Evaluation of the dual route theory of reading : a metanalysis of 35 neuroimaging studies », *Neuroimage*, 20(2), 693-712.

Figure 2.19 D'après figure 1 de Van Atteveldt, N., Formisano, E., Goebel, R. et Blomert, L. (2004), « Integration of letters and speech sounds in the human brain », *Neuron*, 43(2), 271-282.

Figure 2.20 D'après Paulesu *et al.*, (2000), A cultural effect on brain function. *Nat Neurosci*, *3*(1), 91-96

Figure 3.2 D'après figures 2 et 3 de Tamura, H. et Tanaka, K. (2001), « Visual response properties of cells in the ventral and dorsal parts of the macaque inferotemporal cortex », *Cereb. Cortex*, 11(5), 384-399.

Figures 3.3 et 3.6 D'après figures 1, 6 et 7 de Tanaka, K. (2003), « Columns for complex visual object features in the inferotemporal cortex : clustering of cells with similar but slightly different stimulus selectivities », *Cereb. Cortex*, 13(1), 90-99.

Figure 3.4 D'après figures 1 et 3 de Booth, M. et Rolls, E. (1998), « View-invariant representations of familiar objects by neurons in the inferior temporal visual cortex », *Cereb. Cortex*, 8(6), 510-523.

Figure 3.5 D'après figures 1 et 5 de Rolls, E. T. (2000), « Functions of the primate temporal lobe cortical visual areas in invariant visual object and face recognition », *Neuron*, 27(2), 205-218.

Figure 3.7 D'après figures 3 et 4 de Tsunoda, K. *et al.* (2001), « Complex objects are represented in macaque inferotemporal cortex by combination of feature columns », *Nat. Neurosci.*, 4(8), 832-838.

Figure 3.8 Biederman, I. (1987), « Recognition-by-components : A theory of human image understanding », *Psychological Review*, 94, 115-147.

Figure 3.9 D'après Sakai et Miyashita (1991), Neural organization for the long-term memory of paired associates. *Nature*, *354*(6349), 152-155.

Figure 3.11 D'après figures 2 et 4 de Hasson, U. *et al.* (2002), « Eccentricity bias as an organizing principle for human high-order object areas », *Neuron*, 34(3), 479-490.

Figure 3.12 D'après figures 1 et 2 de Cohen, L. *et al.* (2004), « Learning to read without a left occipital lobe : right-hemispheric shift of visual word form area », *Ann. Neurol.*, 56(6), 890-894.

Figure 4.2 D'après figures 2 et 6 de Changizi, M. A., *et al.* (2006), « The structures of letters and symbols throughout human history are selected to match those found in objects in natural Scenes », *Am. Nat.*, 167(5), E117-139.

Figure 4.3 © Robert Fradkin. http://www.wam.umd.edu/~/rfradkin/

Figure 5.1 © Ed Hubbard.

Figure 5.3 D'après les données de Seymour et coll. (2003).

Figure 6.1 D'après Eraldo Paulesu, figure 3 panel D de Paulesu, E. *et al.* (2001), « Dyslexia : Cultural diversity and biological unity », *Science*, 291(5511), 2165-2167, et figure 3 de Silani, G. *et al.* (2005), « Brain abnormalities underlying altered activation in dyslexia : A voxel based morphometry study », *Brain*, 128(Pt 10), 2453-2461, Figure du bas : © Albert Galaburda.

Figure 6.2 D'après figure 1a de Klingberg, T. *et al.* (2000), « Microstructure of temporo-parietal white matter as a basis for reading ability : evidence from diffusion tensor magnetic resonance imaging », *Neuron*, 25(2), 493-500.

Et d'après figures 3a et 4a de Beaulieu, C. *et al.* (2005), « Imaging brain connectivity in children with diverse reading ability », *Neuroimage*, 25(4), 1266-1271.

Figure 6.3 D'après figure 1 de Temple, E. *et al.* (2003), « Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation : evidence from functional MRI », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 100(5), 2860-2865.

Figure 7.1 Figure du haut d'après Walsh, V. et Butler, S. R. (1996), « The effects of visual cortex lesions on the perception of rotated shapes », *Behav. Brain Res.*, 76(1-2), 127-142.

Figure 7.4 Figure tirée de Logothetis, N. K. et Pauls, J. (1995), « Psychophysical and physiological evidence for viewer-centered object representations in the primate », *Cereb. Cortex*, 5(3), 270-288.

Figure 7.5 D'après figures 3 A et B de Houzel, J. C. *et al.* (2002), « Interhemispheric connections between primary visual areas : beyond the midline rule », *Braz. J. Med. Biol. Res.*, 35(12), 1441-1453.

Figure 7.6 D'après figures 6, 7 et 9 de Turnbull, O. H. *et al.* (1997), « Agnosia for object orientation : implications for theories of object recognition », *Neuropsychologia*, 35(2), 153-163.

Figure 7.7 D'après figure 1 de Gottfried, J. A. *et al.* (2003), « Acquired mirror writing and reading : evidence for reflected graphemic representations », *Neuropsychologia*, 41(1), 96-107.

Figure 7.8 Figure tirée de table 2 et figure 1 de McCloskey, M. et Rapp, B. (2000), « A visually based developmental reading deficit », *Journal of Memory and Language*, 43, 157-181.

Et de McCloskey, M. *et al*. (1995), « A developmental deficit in localizing objects from vision », *Psychological Science*, 6, 112-117.

Figure 8.1 Figure de gauche tirée de Tanaka, M. *et al*. (2003), « Finger drawing by infant chimpanzees (Pan troglodytes) », *Anim. Cogn.*, 6(4), 245-251.

Figure de droite reproduite avec la permission du site http://www.great-apes.com, © Canadian Ape Alliance.

Figure 8.2 Figure en bas à gauche d'après la figure 3 de Goldman-Rakic, P. S. (1988), « Topography of cognition : Parallel distributed networks in primate association cortex », *Annual Review of Neuroscience*, 11, 137-156.

Figure en bas à droite d'après figure 1 de Catani, M. et Ffytche, D. H. (2005), « The rises and falls of disconnection syndromes », *Brain*, 128(Pt 10), 2224-2239.

Pour toutes les autres figures : © S. Dehaene.

Remerciements

Les travaux que j'ai menés sur la lecture et ses bases cérébrales ont été réalisés en collaboration étroite avec mon ami Laurent Cohen, professeur de neurologie à l'hôpital de La Pitié-Salpêtrière et grand spécialiste de la lecture et de ses troubles. C'est dans le feu de nos discussions que se sont forgées bon nombre des idées que j'ai développées ici. Je remercie également tous nos collaborateurs, et notamment Raphaël Gaillard, Antoinette Jobert, Sid Kouider, Denis Le Bihan, Stéphane Lehéricy, Jean-François Mangin, Nicolas Molko, Lionel Naccache, Jean-Baptiste Poline, Philippe Pinel, Mariano Sigman et Fabien Vinckier.

Au fil des années, je ne compte plus les collègues qui m'ont guidé dans l'immense littérature sur les mots et leurs maux. Certains m'ont envoyé leurs travaux, d'autres ont relu mes articles au moment de leur publication, souvent avec un utile regard critique, d'autres encore ont relu certains chapitres de ce livre ou m'ont autorisé à reproduire des images de leur travail. Il serait impossible de les citer tous, mais je suis particulièrement redevable à Irving Biederman, Catherine Billard, Brian Butterworth, Alfonso Caramazza, Jean-Pierre Changeux, Joe Devlin, Guinevere Eden, Uta Frith, Albert Galaburda, Jonathan Grainger, Ed Hubbard, Alumit Ishai, Nancy Kanwisher, Régine Kolinsky, Heikki Lyytinen, Bruce McCandliss, Yasushi Miyashita, Jose Morais, John Morton, Kimihiro Nakamura, Tatiana Nazir, Eraldo Paulesu, Monique Plaza, Michael Posner, Cathy Price, Franck Ramus, Marcin Szwed, Sally et Bennett Shaywitz, Dan Sperber, Liliane Sprenger-Charolles, Ovid Tzeng, et Joe Ziegler.

L'organisation de ce livre a grandement bénéficié de la relecture attentive d'Odile Jacob que je souhaite remercier très vivement. Cyrille Bégorre-Bret et Émilie Barian m'ont également apporté leur concours. Je

remercie également Roger Chartier qui, au cours d'une passionnante conversation, m'a aidé à comprendre certains aspects de l'histoire de la lecture. Je lui dois plusieurs des citations qui émaillent le texte, et notamment le poème de Francisco de Quevedo qui figure en exergue. Christian Marendaz m'a aidé à utiliser son logiciel de filtrage qui simule la perte de résolution de la rétine, avec lequel j'ai conçu la figure 1.1. Enfin, Ovid Tzeng m'a très aimablement procuré l'histoire chinoise de la figure 1.3, et Xiaolin Sun m'a aidé à la traduire.

Une mention toute particulière, enfin, revient à mon épouse, Ghislaine Dehaene-Lambertz, à la fois fidèle collaboratrice, *mater familias*, source constante d'encouragements et relectrice critique, sans qui rien n'aurait été possible.

STANISLAS DEHAENE

Stanislas Dehaene est professeur au Collège de France, titulaire de la chaire de psychologie cognitive expérimentale et membre de l'Académie des sciences. Il est l'auteur de *La Bosse des maths*.

Les Neurones de la lecture s'ouvre sur une énigme : comment notre cerveau de primate apprend-il à lire ? Comment cette invention culturelle, trop récente pour avoir influencé notre évolution, trouve-t-elle sa place dans notre cortex ?

Voici qu'émerge une nouvelle science de la lecture. Tandis que l'imagerie cérébrale en révèle les circuits corticaux, la psychologie en dissèque les mécanismes. Ces résultats inédits conduisent à une hypothèse scientifique nouvelle. Au cours de l'acquisition de la lecture, nos circuits neuronaux, conçus pour la reconnaissance des objets, doivent se recycler pour déchiffrer l'écriture – une reconversion lente, partielle, difficile, qui explique les échecs des enfants et suggère de nouvelles pistes pédagogiques.

Qu'est-ce que la dyslexie ? Certaines méthodes d'enseignement de la lecture sont-elles meilleures que d'autres ? Pourquoi la méthode globale est-elle incompatible avec l'architecture de notre cerveau ? Utilise-t-on les mêmes aires cérébrales pour lire le français, le chinois ou l'hébreu ? La lecture subliminale existe-t-elle ? Autant de questions auxquelles Stanislas Dehaene, spécialiste de la psychologie et de l'imagerie cérébrale, apporte l'éclairage des avancées les plus récentes des neurosciences.

préface de **Jean-Pierre Changeux**

LES NEURONES DE LA LECTURE

Couverture : © Fototeca/Leemage.
Photo auteur : Patrick Imbert/© Photothèque du Collège de France